



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Рубцовский индустриальный институт (филиал)
**ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова»**

В.В. Борисовский

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

(теория и практика)

**Учебное пособие для студентов технических
направлений всех форм обучения**

Рубцовск 2015

ББК 530.1

Борисовский В.В. Электромагнетизм (теория и практика): Учебное пособие для студентов технических направлений всех форм обучения/ Рубцовский индустриальный институт.- Рубцовск, 2015. - 51 с.

Пособие представляет собой краткую теорию электромагнетизма. Даются вопросы, которые возникают в жизни, природе и технике при рассмотрении различных электромагнитных явлений. Имеются подсказки и подробные ответы на все вопросы.

Рассмотрено и одобрено на заседании
НМС Рубцовского индустриального
института
Протокол № 1 от 19.02.2015 г.

Рецензент:

к.т.н., доцент С.А. Гончаров

Содержание

Введение	4
I. Электромагнетизм	6
1.1. Магнитное поле токов	6
1.2. Закон Био-Савара-Лапласа и его применение	8
1.3. Закон Ампера и его применение	10
1.4. Движение зарядов в магнитном поле. Сила Лоренца	11
1.5. Электромагнитная индукция	13
1.6. Вихревые токи (токи Фуко)	14
1.7. Явление самоиндукции	15
1.8. Взаимная индукция. Трансформатор	16
1.9. Энергия магнитного поля	17
II. Вопросы и задачи	19
III. Подсказки	33
IV. Ответы	36

Введение

Магнитные явления были известны еще в глубокой древности. История магнетизма уходит корнями к античным цивилизациям Малой Азии. Именно на территории Малой Азии, в Магнезии, находили горную породу, образцы которой притягивались друг к другу. По названию местности такие образцы и стали называть «магнитами». Магнитными свойствами обладает природный магнитный железняк (закись-окись железа $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3$), который способен притягивать скрепки, гвозди и другие железные предметы, а также их намагничивать.

Любой магнит в форме стрелки и подковы имеет две торцевые поверхности, которые называют полюсами. Если подвесить прямой магнит в центре тяжести на нить, то один полюс всегда будет указывать на север. Точно не известно, когда этот факт был обнаружен, но китайские мореплаватели уже в XI веке, а возможно и раньше, использовали его для целей навигации. Речь, естественно, идет о компасе – магнитная стрелка с точкой опоры в центре масс так, что она может вращаться. Обращенный на север полюс свободно висящего магнита называют **северным полюсом** (N). Противоположный полюс направлен на юг и называется **южным полюсом** (S). Ориентация магнита вдоль географического меридиана говорит о том, что Земля обладает магнитными свойствами, то есть является большим магнитом.

Хорошо известно, что, если поднести два магнита друг к другу, между ними действует сила. Это напоминает взаимодействие зарядов или наэлектризованных тел. Недаром на протяжении многих веков эти явления путали. Лишь английскому ученому и врачу У.Гильберту (1544-1603) в конце XVI удалось доказать, что это не одно и то же. Ведь магнит не нуждается в трении, чтобы притягивать. И эта способность не исчезает со временем, как у наэлектризованных тел, если только не нагреть магнит до очень высоких температур.

У. Гильберт выяснил, что у постоянного магнита два полюса, которые взаимодействуют с полюсами другого магнита, и в середине находится нейтральная зона. Одноименные полюса магнитов отталкиваются, разноименные – притягиваются, нейтральная зона и полюса не взаимодействуют друг с другом. Возникшая идея о существовании положительной и отрицательной «магнитной массы» подверглась сомнению, так как при делении большого магнита образовывались два маленьких, которые также имели два полюса и нейтральную зону. Получить изолированный магнитный полюс никому не удалось, несмотря на то, что на это затрачено немало усилий.

Загадку магнетизма после исследований У.Гильберта не могли решить в течение двух столетий до тех пор, пока в 1800 году итальянский физик А.Вольта (1745-1827) не изобрел электрическую батарею («вольтов столб»), с помощью которой он впервые получил постоянный электрический ток. Вольтов столб оказался поистине «рогом изобилия». Новые открытия непрерывно следовали одно за другим. Английский химик и физик Г.Дэви (1778-1829) разложил током щелочи и получил металлический натрий и калий, русский физик А.А. Петров (1761-1834) открыл электрическую дугу и так далее. Наконец, датский физик Х. Эрстед (1777-1851) в 1820 году сделал самое важное открытие. Поместив магнитную стрелку вблизи провода с током, Х.Эрстед обнаружил, что она поворачивается, то есть магнитная стрелка реагировала на движущиеся заряды. Находясь рядом с неподвижными зарядами, стрелка

оставалась в покое. Следовательно, магнетизм связан не со статическим электричеством, а с электрическим током.

Открытие Х.Эрстеда буквально через несколько месяцев позволило наконец дать ответ на вопрос, что определяет магнитные свойства тел. Сделал это французский физик Андре Ампер (1755-1836) в том же 1820 году. Он говорил, что внутри молекул, из которых состоит любое вещество, циркулируют элементарные электрические токи. Если эти токи ориентированы хаотично, то их действие взаимно компенсируется и никаких магнитных свойств у тела не обнаруживается. В намагниченном состоянии элементарные токи в теле ориентированы строго определенным образом, так что их действия складываются.

А.Ампер не только объяснил магнитное взаимодействие, но и установил, что токи одного направления притягиваются, а противоположно направленные - отталкиваются. Идеи и исследования А.Ампера привели впоследствии английского физика Майкла Фарадея (1791-1867) к новому величайшему открытию. Он в 1831 году открыл явление электромагнитной индукции – возникновение электрического тока в проводнике при изменении магнитного поля.

I. Электромагнетизм

Магнитные свойства некоторых железных руд, встречающихся в природе, известны еще с глубокой древности и получили применение в устройстве магнитного компаса. Магниты, даже находясь на некотором расстоянии, взаимодействуют друг с другом. Это говорит о том, что вокруг магнита существует особое **магнитное поле**, посредством которого передается воздействие одного магнита на другой. Магнит ведет себя в магнитном поле так же, как электрический диполь в электрическом поле: он стремится повернуться по полю.

1.1. Магнитное поле токов

В 1820 году было установлено (Х.Эрстед), что проводники, по которым бегут электрические токи, взаимодействуют с магнитной стрелкой. Положение магнитной стрелки, помещенной около проводника с током, изменяется с изменением величины и направления тока, но она совершенно не реагирует на неподвижные электрические заряды. Отсюда следует, что способностью создавать магнитное поле обладают лишь движущиеся электрические заряды (электрический ток), а вокруг неподвижных зарядов существует электрическое поле.

Магнитное поле, возникающее в пространстве около проводников с током, как и электрическое поле, обусловленное неподвижными электрическими зарядами, является одним из **видов материи**. Оно обладает определенными физическими свойствами, как силовыми, так и энергетическими.

Для определения количественной характеристики магнитного поля выберем **пробное тело**, реагирующее на магнитное поле. Таким телом является очень маленькая рамка с током. Если пробную рамку (контур) с током поместить в исследуемую точку магнитного поля, то на нее будет действовать момент сил M , зависящий от многих факторов, в том числе и от ориентации.

Максимальное значение M_{max} пропорционально силе тока в рамке I и площади S , охватываемой рамкой, то есть

$$M_{max} \sim IS. \quad (1)$$

Величина $p_m = IS$ называется **магнитным моментом контура с током**. Магнитный момент p_m – векторная величина. Для плоского контура с током вектор p_m перпендикулярен плоскости контура и совпадает с направлением положительной нормали к рамке.

Если в данную точку магнитного поля помещать рамки с различными магнитными моментами, то на них действуют различные вращающие моменты, но отношение $\frac{M_{max}}{p_m}$ для всех контуров в данной точке поля остается величиной постоянной и поэтому может служить силовой характеристикой магнитного поля, называемой **магнитной индукцией**:

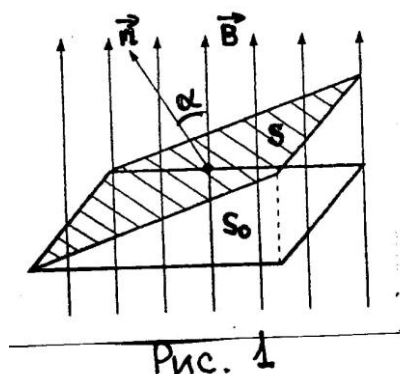
$$B = \frac{M_{max}}{p_m}. \quad (2)$$

Магнитная индукция в данной точке однородного магнитного поля определяется максимальным вращающим моментом, действующим на рамку с магнитным

моментом, равным единице, когда нормаль к рамке перпендикулярна направлению поля. Единицей магнитной индукции является тесла (Тл): $1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н} \cdot \text{м}}{1 \text{ А} \cdot \text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$.

Так как магнитное поле является *силовым*, то его по аналогии с электрическим изображают с помощью *линий магнитной индукции*, касательные к которым показывают направление вектора B . Густота линий, то есть число линий, проходящих через единичную перпендикулярно к ним расположенную площадку, пропорциональна модулю вектора B .

Если магнит, имеющий два магнитных полюса, разделить на две части, то каждая из них вновь будет магнитом с двумя полюсами. Это означает, что отсутствуют магнитные заряды, на которых бы начинались или заканчивались линии магнитной индукции, в отличие от электрических зарядов, на которых начинаются или заканчиваются линии напряженности электрического поля. Так как линии магнитной индукции не имеют ни начала, ни конца, то они являются *замкнутыми*. Подобные поля называются *вихревыми*.



Рассмотрим некоторую площадку S , находящуюся в области магнитного поля с индукцией B (рис.1). Число линий магнитной индукции, пронизывающих площадку S и ее проекцию на плоскость S_0 , перпендикулярную линиям, одинаково. Густота линий, то есть общее число линий, пронизывающих обе площадки, называется *магнитным потоком* Φ . Магнитный поток пропорционален модулю индукции B и площадке S_0 :

$$\Phi = BS_0. \quad (3)$$

Так как $S_0 = S \cos \alpha$, то

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad (4)$$

где α – угол между вектором B и нормалью n к площадке S (рис.1). Единицей магнитного потока является *вебер* (Вб) $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$.

В общем случае, когда магнитное поле неоднородно или когда рассматривается произвольная поверхность, магнитный поток также пропорционален числу линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность. В этом случае магнитный поток вычисляется интегрированием по поверхности:

$$\Phi = \int_S B_n dS, \quad (5)$$

где B_n – проекция вектора B на направление нормали n к площадке dS .

До сих пор мы рассматривали макротоки, текущие в проводниках. Однако в любом теле существуют микротоки, обусловленные движением электронов в атомах и молекулах. Эти молекулярные микротоки создают магнитное поле и могут ориентироваться в магнитных полях макротоков, создавая в теле дополнительное магнитное поле. Вектор магнитной индукции B , таким образом, характеризует *результатирующее магнитное поле*, создаваемое всеми *макро-* и *микротоками*, то есть при прочих равных условиях вектор B в различных средах будет иметь различные значения.

Магнитное поле макротоков описывается **вектором напряженности H** . В однородной изотропной среде вектор магнитной индукции B связан с вектором напряженности H соотношением:

$$B = \mu_0 \mu H, \quad (6)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}^2$ – магнитная постоянная, μ – **магнитная проницаемость среды**, показывающая, во сколько раз магнитное поле макротоков H изменяется за счет поля микротоков. Она не зависит от выбора системы единиц и равна единице для вакуума. Во всех средах, кроме ферромагнитных, значение μ очень мало отличается от единицы. Ферромагнитные материалы, к которым относятся железо, кобальт, никель и гадолиний и их сплавы, имеют значения μ от нескольких сот до нескольких тысяч у железа.

1.2. Закон Био-Савара-Лапласа и его применение

В 1820 году французские физики Ж.Био (1774-1962) и Ф.Савар (1791-1841) исследовали магнитные поля постоянных токов в воздушном пространстве. На основе многочисленных опытов они пришли к выводу, что напряженность магнитного поля в произвольной точке пространства: 1) пропорциональна силе тока; 2) зависит от формы и размеров проводника с током; 3) зависит от расположения этой точки по отношению к проводнику с током.

Результаты опытов Ж.Био и Ф.Савара были обобщены выдающимся французским математиком и физиком П.Лапласом (1749-1827) в виде дифференциального закона, называемого законом Био-Савара-Лапласа:

$$dH = \frac{I dl \sin \alpha}{4\pi r^2}, \quad (7)$$

где dl – длина элементарного участка проводника, r – радиус-вектор, проведенный из элемента проводника dl в рассматриваемую точку A , α – угол между вектором элемента тока dl и радиус-вектором r (рис.2).

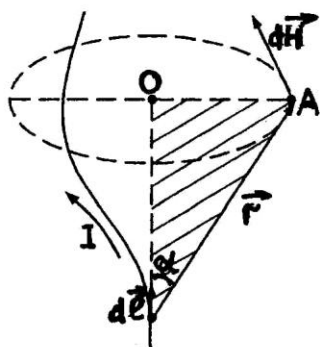


Рис. 2.

Направление dH перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы dl и r , и совпадает с касательной к линии индукции магнитного поля. Это направление может быть найдено по правилу правого винта: направление вращения головки винта дает направление dH , если поступательное движение винта соответствует направлению тока в элементе dl .

Закон Био-Савара-Лапласа позволяет найти напряженность H и индукцию B магнитного поля электрического тока, текущего по проводнику произвольной формы. В соответствии с принципом суперпозиции (наложения) напряженность магнитного поля в произвольной точке пространства вокруг проводника с током I равна векторной сумме

$$H = \int dH, \quad (8)$$

где dH – напряженность магнитного поля, создаваемого элементом проводника длиной dl . Интегрирование производится по всей длине проводника l .

Расчет характеристик магнитного поля (B и H) по формулам (7) и (8) в общем случае довольно сложен. Однако если проводники с током имеют определенную симметрию, то применение закона Био-Савара-Лапласа совместно с принципом суперпозиции позволяет довольно просто рассчитать некоторые магнитные поля проводников с током.

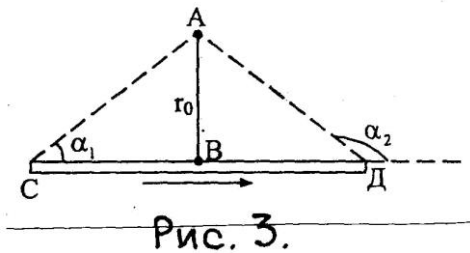


Рис. 3.

Напряженность магнитного поля H прямолинейного проводника с током конечной длины в точке A (рис.3) определяется по формуле

$$H = \frac{I}{4\pi r_0} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2), \quad (9)$$

где r_0 – длина перпендикуляра AB , опущенного из точки A на проводник, α_1, α_2 – значения углов для крайних точек проводника CD (угол α берется между направлением тока и прямой, проведенной из точки A на крайние точки проводника). Если проводник CD бесконечно длинный, то $\alpha_1 = 0$, а $\alpha_2 = \pi$ и тогда напряженность магнитного поля в любой точке такого проводника с током равна

$$H = \frac{I}{2\pi r_0}. \quad (10)$$

Напряженность магнитного поля в центре кругового тока радиусом r (проводник в форме окружности) находим по формуле

$$H = \frac{I}{2r}. \quad (11)$$

Зная напряженность магнитного поля H и магнитную проницаемость среды μ , получим индукцию магнитного поля для:

а) конечного прямолинейного проводника

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2); \quad (12)$$

б) бесконечно длинного проводника

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r_0}; \quad (13)$$

в) кругового тока

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2 r_0}. \quad (14)$$

Система последовательно соединенных круговых токов одинакового радиуса, имеющих общую ось, является устройством, которое носит название **соленоид**. Соленоид – это цилиндрическая катушка, состоящая из большого числа намотанных вплотную друг к другу витков провода, по которому идет ток. Напряженность магнитного поля внутри соленоида, у которого его длина много больше радиуса витков ($l \gg r$), определяется по формуле:

$$H = nI, \quad (15)$$

где n – число витков на единицу длины соленоида (если общее число витков N , а длина соленоида l , то $n=N/l$), I – сила тока.

Индукция магнитного поля соленоида равна

$$B = \mu_0 \mu nI. \quad (16)$$

1.3. Закон Ампера и его применение

Действие магнитного поля на проводники с током было обнаружено Г.Эрстедом и А.Ампером в 1820 году. А.Ампер подробно исследовал это явление и пришел к выводу, что сила F , которая действует на прямолинейный проводник с током, находящимся в однородном магнитном поле, пропорциональна силе тока I в проводнике, его длине l , магнитной индукции B и синусу угла α между направлением тока в проводнике и вектором B :

$$F = BIl \sin \alpha. \quad (17)$$

Однородным магнитным полем является такое поле, во всех точках которого векторы индукции равны по величине и одинаковы по направлению. Направление силы F , действующей на проводник с током, определяется по **правилу левой руки**: если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входили линии магнитной индукции, а четыре вытянутых пальца расположить по направлению тока в проводнике, то отогнутый большой палец покажет направление силы, действующей на ток.

Закон Ампера (17) можно применять для случая неоднородного магнитного поля и проводника произвольной формы. Для этого проводник необходимо разбить на бесконечно малые участки dl . Тогда малый элемент dl проводника любой формы можно считать прямолинейным, а магнитное поле в области, занятой элементом dl , можно считать однородным. Сила dF , действующая в этом случае на элемент проводника dl , будет равна

$$dF = BIdl \sin \alpha, \quad (18)$$

где α – угол между векторами dl и B . Результирующая сила, действующая на весь проводник, будет находиться путем интегрирования по всей длине проводника.

Для определения силы взаимодействия двух проводников с током также применяется закон Ампера. Если по проводнику течет ток, то вокруг проводника создается магнитное поле, в котором находится другой проводник с током. В результате

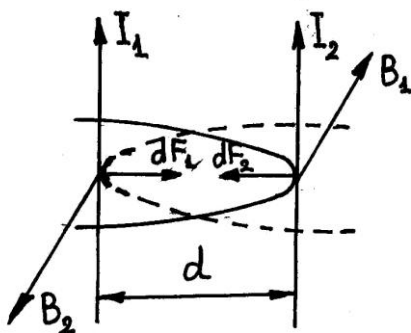


рис. 4.

между проводниками появляется сила взаимодействия. Они будут либо притягиваться друг к другу, либо отталкиваться, так как каждый проводник с током находится в магнитном поле другого проводника. Рассмотрим два бесконечных прямолинейных параллельных тока I_1 и I_2 (направление токов указано на рис.4), расстояние между которыми равно d . Каждый из проводников создает магнитное поле, которое действует по закону Ампера на другой проводник с током.

Определим, с какой силой действует магнитное поле тока I_1 на элемент dl второго проводника с током I_2 . Ток I_1 создает вокруг себя магнитное поле, линии магнитной индукции которого представляют собой концентрические окружности. Направление вектора B_1 определяется по правилу правого винта (рис.4), и его величина определяется по формуле (13):

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1}{d}.$$

Направление силы dF_2 , действующей на элемент dl тока I_2 со стороны поля с индукцией B_1 , определяется по правилу левой руки. Модуль силы, согласно (18) с учетом того, что угол α между направлением тока I_2 и вектором B_1 прямой, равен:

$$dF_2 = B_1 I_2 dl = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{d} \cdot dl. \quad (19)$$

Рассуждая аналогично, можно показать, что сила dF_1 , с которой магнитное поле тока I_2 действует на элемент dl проводника с током I_1 , равна

$$dF_1 = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{d} \cdot dl,$$

то есть $dF_1 = dF_2$ и при этом два параллельных тока одинакового направления притягиваются друг к другу. Если токи имеют противоположные направления, то легко доказать, что между ними действует сила отталкивания, также определяемая по формуле (19).

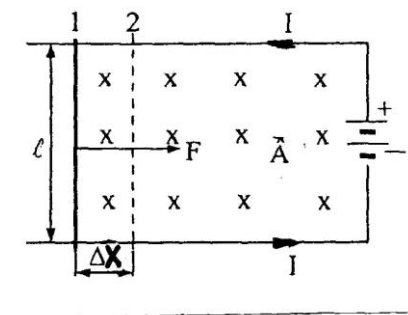


Рис. 5.

Если на проводник с током, помещенным в магнитное поле, действует сила Ампера, то проводник перемещается, то есть магнитное поле совершает работу по перемещению проводника. Для определения этой работы возьмем отрезок проводника длиной l , который перемещается в магнитном поле из положения 1 в положение 2 (рис.5). Поле перпендикулярно протекающему по проводнику току, направление которого показано на рис.5, и тогда сила, действующая на проводник с током, равна $F=BIl$, а работа $\Delta A = F\Delta x = BIl\Delta x$.

Величина $l\Delta x$ равна площади ΔS магнитного поля B , которую пересек при своем движении отрезок проводника, а произведение $B\Delta S$ равно изменению потока вектора магнитной индукции $\Delta\Phi$, пронизывающего весь контур с током, составной частью которого является подвижный проводник l , то есть

$$\Delta A = I\Delta\Phi. \quad (20)$$

Работа, совершаемая силами Ампера при перемещении проводника в магнитном поле, равна произведению силы тока на изменение магнитного потока сквозь поверхность, которую прочерчивает проводник при своем движении.

1.4. Движение зарядов в магнитном поле. Сила Лоренца

Магнитное поле действует не только на проводники с током, но и на отдельные электрические заряды, движущиеся в поле. Процесс взаимодействия движущихся зарядов с внешним магнитным полем исследовал нидерландский физик Х.А. Лоренц (1831-1928), который в результате обобщения опытных данных вывел формулу для расчета силы, действующей со стороны магнитного поля на движущийся заряд. Эта сила называется *силой Лоренца*.

Найдем выражение для силы, действующей на заряд, движущийся в магнитном поле. По закону Ампера (17) сила, действующая на проводник с током, равна $F = BIl\sin\alpha$. Сила тока по определению равна $I = \frac{qN}{t}$, где q – заряд, N – количество зарядов, проходящих через поперечное сечение проводника за промежуток времени t . Очевидно, что $N/t = nvS$, где n – концентрация зарядов (количество зарядов в еди-

нице объема), v – скорость движения зарядов, S – площадь поперечного сечения проводника. Тогда

$$I = qnvS, \quad (21)$$

а силу Ампера получим в виде

$$F = qnvSB\sin\alpha. \quad (22)$$

Данная сила действует на все заряды, содержащиеся в объеме проводника $V=Sl$. Количество зарядов, находящихся в этом объеме, равно $N=nSl$. Тогда сила, действующая на один заряд, будет равна

$$F_{\text{л}} = \frac{F}{N} = \frac{qnvSlB\sin\alpha}{nSl} = qvB\sin\alpha. \quad (23)$$

Следовательно, сила Лоренца определяется по формуле (23).

Сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно к вектору скорости заряженной частицы v и вектору индукции B , сообщая ей нормальное ускорение. Так как сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно к вектору скорости, то она не совершает работы. Она изменяет только направление скорости движения частицы в магнитном поле, а величина скорости и кинетическая энергия заряда не изменяются.

Направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки: если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входил вектор B , а четыре вытянутых пальца направлены вдоль вектора v , то отогнутый большой палец покажет направление силы, действующей на положительный заряд. На отрицательный заряд, движущийся в том же направлении и в том же магнитном поле, сила действует в противоположном направлении.

Закономерности движения заряженных частиц в однородном магнитном поле при действии на них силы Лоренца позволили разработать весьма точные методы экспериментального нахождения масс этих частиц. Для определения массы частицы измеряли ее заряд и удельный заряд q/m . Масса электрона была определена в 1897 году английским физиком Д.Д. Томсоном (1856-1940) на установке, похожей на электронно-лучевую трубку. В 1919 году англичанин Ф.У. Астон (1877-1945), ученик Томсона, сконструировал прибор, названный масс-спектрографом, с помощью которого были измерены массы многих элементов, доказано наличие изотопов у этих элементов.

Действие силы Лоренца на движущиеся заряженные частицы в магнитном поле позволило объяснить возникновение на поверхностях проводника (нижней и верхней) разности потенциалов при *эффekte Холла* (Э.Холл (1855-1938) - американский физик), а также в *магнитогидродинамическом генераторе* (МГД-генераторе). И в том и в другом случаях при движении заряженного вещества, создающего ток с плотностью J , между поперечным магнитным полем с индукцией B возникает электрическое поле в направлении, перпендикулярном векторам J и B . В металлах при эффекте Холла заряженным веществом являются электроны, в полупроводниках – электроны и дырки, в МГД-генераторах заряженным веществом являются проводящие среды – продукты сгорания топлив, инертные газы с присадками щелочных металлов, жидкие металлы, электролиты, ионизированные газы, плазма.

В результате действия силы Лоренца на заряженную частицу, движущуюся перпендикулярно магнитному полю, она будет двигаться по окружности. Это свойство заряженной частицы используется в циклических ускорителях для получения

частиц с высокой энергией. В циклических ускорителях заряженная частица, помещенная между полюсами сильного электромагнита постоянного тока, многократно проходит через электрическое поле, каждый раз увеличивая свою энергию от нескольких сот до нескольких тысяч электронвольт ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$). Для управления движением частиц и периодического возвращения их в область ускоряющего электрического поля применяется поперечное магнитное поле. Ускорение тяжелых частиц (протонов, ионов) производится в циклических резонансных ускорителях: циклотронах, фазотронах, синхрофазотронах; ускорение электронов – в бетатронах, синхротронах.

1.5. Электромагнитная индукция

Основываясь на том, что вокруг проводника с током возникает магнитное поле, английский физик М.Фарадей (1791-1867) в 1821 году высказал предположение, что с помощью магнитного поля можно получить ток в проводнике. Через десять лет, в 1831 году, М.Фарадей обнаружил, что если намотать на сердечник две обмотки и в одной менять силу тока, то во второй обмотке возникает ток. Затем он установил, что ток во второй обмотке резко усиливается, если сердечником является железо. Далее оказалось, что обмотку с током можно заменить магнитом и ток в катушке возникает при перемещении магнита относительно катушки. Возникающий ток в катушке при проведении всех этих экспериментов М.Фарадей назвал *индукционным*, а само явление, открытое Фарадеем, получило название *электромагнитной индукции*.

Ток проводимости в замкнутой цепи может возникнуть под действием стороннего электрического поля. Следовательно, в замкнутом контуре, находящемся в переменном магнитном поле, появляется *индукционное электрическое поле*. Энергетической мерой этого поля служит *электродвижущая сила электромагнитной индукции* (ЭДС индукции) \mathcal{E}_i . Величина индукционного тока, а следовательно, и ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока Φ сквозь поверхность замкнутого контура (*закон Фарадея*):

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (24)$$

где знак минус является математическим выражением правила Ленца – общего

правила для нахождения направления индукционного тока. Э.Х.Ленц (1804-1865) – русский физик в 1833 году установил правило определения направления индукционного тока, которое читается следующим образом: индукционный ток в контуре имеет всегда такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызвавшему этот ток.

Механизм возникновения индукционного тока и ЭДС электромагнитной индукции в движущемся проводнике можно объяснить с помощью силы Лоренца.

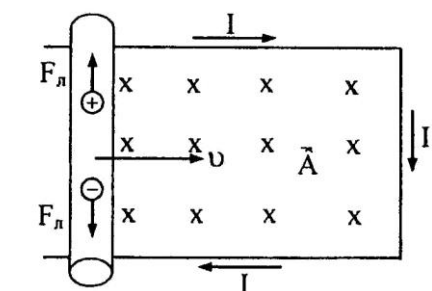


Рис. 6.

Если проводник (подвижная перемычка контура на рис.6) движется в постоянном магнитном поле со скоростью v перпендикулярно направлению вектора индукции B (на рис.6 линии индукции B направлены от нас), то сила Лоренца, действующая на

свободные заряды внутри проводника, $F_L = qvB$ согласно правилу левой руки будет направлена вдоль проводника (рис.6), то есть она будет создавать в проводнике индукционный ток. Таким образом, возбуждение ЭДС индукции при движении контура в постоянном магнитном поле объясняется действием силы Лоренца, возникающей при движении проводника. В этом случае происходит изменение магнитного потока $\Phi=BS$ в результате изменения площади контура.

По закону Фарадея, возникновение ЭДС индукции возможно и в том случае, когда контур неподвижен и его площадь не меняется, но меняется индукция магнитного поля B . Так как сила Лоренца на неподвижные заряды не действует, то в данном случае, казалось бы, объяснить возникновение ЭДС индукции невозможно. Английский физик Д.К.Максвелл (1831-1879) для объяснения ЭДС индукции в неподвижных проводниках предположил, что всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле, которое и является причиной возникновения индукционного тока в проводнике.

1.6. Вихревые токи (токи Фуко)

Одним из проявлений электромагнитной индукции является возникновение замкнутых индукционных токов в сплошных массивных проводниках. Отличие этих токов от индукционных в линейных проводниках состоит в том, что для их возникновения нет необходимости включать проводник в замкнутую цепь. Замкнутая цепь индукционного тока образуется в толще самого проводника. Поэтому индукционные токи в массивных проводниках носят вихревой характер.

Сила вихревого тока по закону Ома равна:

$$I_{\text{вихр}} = \frac{\varepsilon_i}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (26)$$

где Φ – магнитный поток сквозь контур, R – сопротивление цепи вихревого тока. Сопротивление R считать очень трудно, но очевидно, что в массивных проводниках оно будет мало и вихревые токи могут достигать большой силы даже в не очень быстро меняющихся магнитных полях (например, в магнитном поле, создаваемом обычным переменным током частотой 50 Гц).

Вихревые токи вызывают сильное нагревание проводников. На это впервые обратил внимание французский физик Л.Фуко (1819-1868), поэтому вихревые токи обычно называют **токами Фуко**. Из закона Джоуля-Ленца ($Q = I^2Rt$) и формулы (26) следует, что количество теплоты, выделяемое в единицу времени вихревым током, пропорционально квадрату частоты изменения магнитного поля. Поэтому в индукционных печах, предназначенных для плавки металлов при помощи токов Фуко, магнитное поле создается переменным током высокой частоты (ТВЧ).

Во многих случаях токи Фуко бывают нежелательны, и приходится применять для борьбы с ними специальные меры. Магнитные цепи электрических машин и сердечники трансформаторов делают не сплошными, а собирают из отдельных тонких листов железа, изолированных друг от друга специальным лаком или окалиной. Пластины располагаются так, чтобы возможные направления токов Фуко были к ним перпендикулярны. Появление ферритов – полупроводниковых ферромагнитных материалов с удельным сопротивлением, в миллиарды раз превышающих удельное

сопротивление металлических ферромагнитных веществ, сделало возможным изготовление сердечников сплошными.

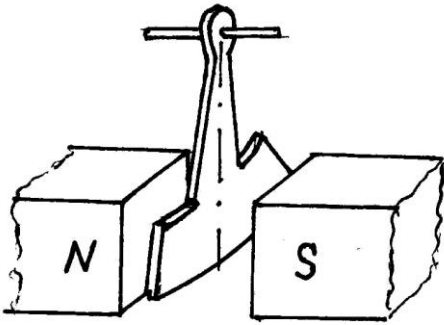


Рис. 7

(например, алюминиевая) пластинка в виде маятника (рис.7), которая вводится в зазор между полюсами сильного магнита. При движении пластинки в ней возникают токи Фуко, вызывающие торможение системы.

В соответствии с правилом Ленца токи Фуко выбирают внутри проводника такие пути и направления, чтобы своим действием возможно сильнее противодействовать причине, которая их вызывает. Поэтому движущиеся в сильном магнитном поле хорошие проводники испытывают сильное торможение, обусловленное взаимодействием токов Фуко с магнитным полем. Этим пользуются для демпфирования (успокоения) подвижных частей амперметров, сейсмографов и других приборов. На подвижной части прибора укрепляется хорошо проводящая

1.7. Явление самоиндукции

Электрический ток, текущий в замкнутом контуре, создает вокруг себя магнитное поле, индукция которого, по закону Био-Савара-Лапласа, пропорциональна силе тока. Отсюда следует, что ток I в контуре или катушке и создаваемый им полный поток (потокосцепление) ψ через контур пропорциональны друг другу:

$$\psi = LI, \tag{27}$$

где коэффициент пропорциональности L называется **индуктивностью контура**.

При изменении силы тока изменяется также магнитный поток, а так как контур находится в собственном изменяющемся магнитном потоке, то в нем индуцируется ЭДС. Возникновение ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении в нем тока называется **самоиндукцией**. Если размер контура и магнитная проницаемость среды μ , окружающей контур, не изменяется, то индуктивность контура L остается постоянной и, используя формулу закона Фарадея (25), выражение для ЭДС самоиндукции можно представить в виде:

$$\mathcal{E}_S = -L \frac{dI}{dt}, \tag{28}$$

то есть ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения тока в контуре и индуктивности.

Рассмотрим, чему равна индуктивность катушки (соленоида). Будем считать катушку бесконечно длинной, а магнитное поле внутри нее – однородным. Тогда магнитная индукция равна $B = \mu\mu_0 nI$, а полный магнитный поток (потокосцепление) $\psi = N\Phi = NBS = \mu\mu_0 nINS$, где μ – магнитная проницаемость сердечника, μ_0 – магнитная постоянная, n – количество витков на единицу длины катушки, N – общее количество витков катушки, S – площадь поперечного сечения. Из выражения (27) имеем

$$L = \frac{\psi}{I} = \mu\mu_0 nNS = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S = \mu\mu_0 n^2 V, \tag{29}$$

где $V=Sl$ – объем соленоида.

За единицу индуктивности в СИ принимается индуктивность такого проводника, у которого при силе тока в 1 А возникает сцепленный с ним полный поток ψ , равный 1 Вб. Эту единицу называют *генри* (Гн).

1.8. Взаимная индукция. Трансформатор

Явление взаимной индукции заключается в наведении ЭДС индукции во всех проводниках, находящихся вблизи цепи переменного тока. Впервые это явление наблюдал Фарадей для двух контуров; при взаимной индукции происходит возникновение ЭДС индукции в одном из двух контуров при изменении силы тока в другом (соседнем).

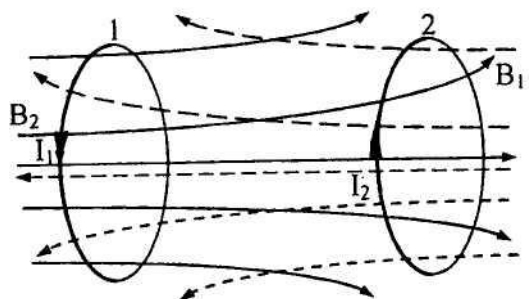


Рис. 8.

Возьмем два контура 1 и 2, расположенных близко друг к другу (рис.8). Если в контуре 1 течет ток I_1 , он создает через контур 2 пропорциональный I_1 полный магнитный поток

$$\psi_2 = L_{21}I_1 \quad (30)$$

(поле, создающее этот поток, изображено на рис.8 сплошными линиями). При изменении тока I_1 в контуре 2 индуцируется ЭДС

$$\mathcal{E}_{12} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}. \quad (31)$$

Аналогично, при протекании в контуре 1 тока I_2 магнитный поток (его поле изображено на рис.8 пунктиром) пронизывает первый контур. При изменении тока I_2 в контуре 1 возникает ЭДС:

$$\mathcal{E}_{21} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}. \quad (32)$$

Коэффициенты L_{21} и L_{12} называются *взаимной индуктивностью контуров*. Расчеты, подтверждаемые опытом, показывают, что L_{21} и L_{12} равны друг другу, то есть

$$L_{12} = L_{21}. \quad (33)$$

Коэффициенты L_{21} и L_{12} зависят от геометрической формы, размеров, взаимного расположения контуров и от магнитной проницаемости окружающей среды. Единица взаимной индуктивности та же, что и для индуктивности, - генри (Гн).

На явлении взаимной индукции основано действие трансформаторов, служащих для повышения или понижения напряжения переменного тока. Впервые трансформаторы были сконструированы и введены в практику русским электротехником

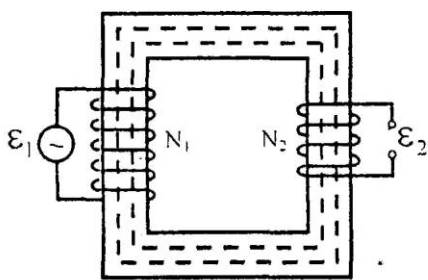


Рис. 9

П.Н. Яблочковым (1847-1894) и русским физиком И.Ф.Усагиным (1855-1919). Принципиальная схема трансформатора приведена на рис.9. Первичная и вторичная катушки (обмотки), имеющие соответственно N_1 и N_2 витков, укреплены на замкнутом железном сердечнике. Концы первичной обмотки присоединены к источнику переменного тока с ЭДС \mathcal{E}_1 , ток I_1 которого создает в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток Φ . Магнитный поток Φ пронизывает витки вторичной обмотки. Изменение этого потока вызывает во вторичной обмотке появление ЭДС взаимной индукции, а в первичной – ЭДС самоиндукции.

Изменение этого потока вызывает во вторичной обмотке появление ЭДС взаимной индукции, а в первичной – ЭДС самоиндукции.

По закону Ома, ток I_1 первичной обмотки определяется суммой внешней ЭДС и ЭДС самоиндукции:

$$\mathcal{E}_1 - N_1 \frac{d\Phi}{dt} = I_1 R_1,$$

где R_1 – сопротивление первичной обмотки. Падение напряжения $I_1 R_1$ на сопротивлении R_1 при быстропеременных полях мало, поэтому

$$\mathcal{E}_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (34)$$

ЭДС взаимной индукции, возникающая во вторичной обмотке,

$$\mathcal{E}_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (35)$$

Из выражений (34) и (35) получаем

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{N_2}{N_1} \mathcal{E}_1, \quad (36)$$

где знак минус показывает, что ЭДС в первичной и вторичной обмотках противоположны по фазе.

Пренебрегая потерями энергии, которые в современных трансформаторах не превышают 2%, можно считать, что мощности тока в обеих обмотках трансформатора практически одинаковы:

$$\mathcal{E}_2 I_2 \approx \mathcal{E}_1 I_1,$$

откуда, учитывая соотношение (36), получим

$$\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} \approx \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1}, \quad (37)$$

то есть токи в обмотках обратно пропорциональны числу витков в этих обмотках.

Отношение числа витков $k = \frac{N_2}{N_1}$ называется *коэффициентом трансформации*. Если $\frac{N_2}{N_1} > 1$, то трансформатор будет повышающим, увеличивающий переменную ЭДС и понижающий ток; если $\frac{N_2}{N_1} < 1$, то трансформатор будет понижающим, уменьшающий ЭДС и повышающий ток (применяется при электросварке, так как для нее требуется большой ток при низком напряжении).

1.9. Энергия магнитного поля

При пропускании тока по проводнику около него возникает магнитное поле, на создание которого затрачивается энергия. Следовательно, магнитное поле является носителем энергии. Эта энергия равна работе, которая затрачивается током на создание магнитного поля.

Рассмотрим контур с индуктивностью L . Данный контур охватывает магнитный поток $\Phi = LI$, который при изменении тока на dI меняется на $d\Phi = LdI$. Для изменения магнитного потока на величину $d\Phi$ необходимо совершить работу $dA = Id\Phi = ILdT$ (см. выражение (20)). Тогда работа по созданию магнитного потока Φ будет равна:

$$A = \int_0^I LIdI = \frac{LI^2}{2}.$$

Следовательно, энергия магнитного поля, связанного с контуром, равна

$$W = \frac{LI^2}{2}. \quad (38)$$

Найдем энергию магнитного поля соленоида. Магнитное поле такого соленоида однородно и в основном сосредоточено внутри него. Индуктивность соленоида $L = \mu\mu_0 n^2 V$ (из уравнения (29)), где n – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида, V – объем внутренней части соленоида (объем, занимаемый магнитным полем).

Из (15) сила тока $I = \frac{H}{n}$. Подставляя L и I в (38), получим:

$$W_M = \frac{\mu\mu_0 n^2 V H^2}{2} = \frac{\mu\mu_0 H^2 V}{2}. \quad (39)$$

Разделив обе части (39) на объем V соленоида, находим объемную плотность энергии магнитного поля:

$$\omega_M = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}, \quad (40)$$

или, учитывая (6),

$$\omega_M = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}. \quad (41)$$

Выражения (40) и (41) справедливы для любого контура магнитного поля, независимо от его происхождения, и определяют энергию магнитного поля в единице объема.

II. Вопросы и задачи

1. **Какой стержень намагничен?** Имеются два абсолютно одинаковых стальных стержня, один из которых намагничен. Как узнать, какой из них намагничен, не пользуясь ничем, кроме самих стержней?

2. **Подковообразный магнит притягивает пластинку.** Сильный подковообразный магнит замкнут железной пластиной А (рис.10). Масса пластины подобрана так, что ее вес равен силе притяжения магнита и магнит еще свободно удерживает пластину. Если прикоснуться сбоку к полюсам магнита пластиной В, сделанной из мягкого железа, то пластина А тотчас упадет. Если пластину В убрать, то магнит вновь сможет удерживать пластину А. Почему так происходит?

3. **Магнит и свободно висящие стальные иголки.** К небольшому латунному диску на крючках свободно подвешено несколько стальных иголок, как показано на рис.11. Если снизу к иголкам медленно подносить сильный магнит (например, северным полюсом), то сначала иголки разойдутся, а затем, когда магнит приблизится почти вплотную, снова вернуться в вертикальное положение. При удалении магнита иголки снова разойдутся, образуя конусообразный пучок. Почему так происходит?

4. **Железная верхушка в магнитном поле.** Русским физиком Ф.Н. Шведовым была предложена модель двигателя следующей конструкции: к небольшой опорной втулке, насаженной на острие, прикреплена вертушка, сделанная из железных проволочек (рис.12). Вертушка может легко вращаться в горизонтальной плоскости. К вертушке поднесен постоянный полосовой магнит, и рядом с магнитом под вертушкой поставлена газовая горелка с сильным пламенем, нагревающая одну из проволочек (рис.12). Под действием магнита и горелки вертушка начинает равномерно вращаться.

Объясните причины, вызывающие движение вертушки.

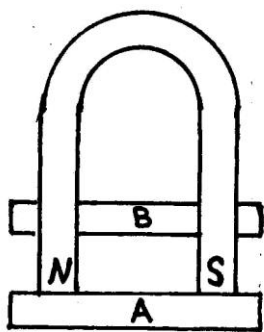


Рис. 10

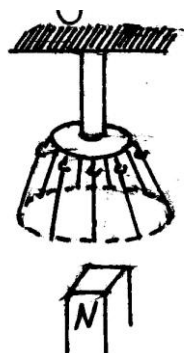


Рис. 11

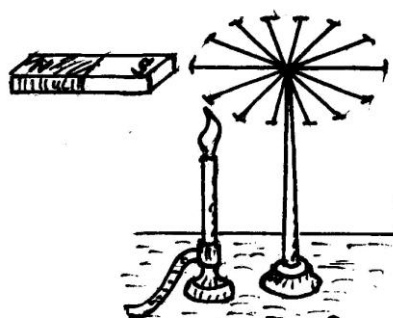


Рис. 12

5. **Колебание стального шарика в магнитном поле.** Небольшой стальной шарик подвешен на тонкой несгораемой нити. Около шарика находится сильный электромагнит (рис.13). Между шариком и магнитом расположено пламя сильной газовой горелки так, что когда шарик под действием магнита отклоняется, то он обязательно попадает в это пламя. Если включить ток в обмотку электромагнита, то шарик сейчас же отклонится, попадет в пламя горелки и затем через некоторое время, как бы «обжегшись», выскочит из пламени и вернется в исходное положение. Через некоторое время шарик снова начнет притягиваться к магниту.

Объясните причину возникновения таких периодических колебаний стального шарика на нити.

6. **Магнит сверху и сбоку железного стержня.** Длинный стержень из мягкого железа закреплен в вертикальном положении. Если к верхнему концу стержня поднести сильный магнит (рис.14,а), то стержень намагнитится так сильно, что его свободный конец начнет притягивать железные опилки. Если тот же самый магнит приложить к стержню сбоку, совсем близко от нижнего конца (рис.14,б), то такого сильного намагничивания не возникает и опилки уже не удерживаются возле нижнего конца. Чем это можно объяснить?

7. **Магнит удерживает гирлянду из железных цилиндров.** Сильный магнит может удерживать гирлянду, состоящую из нескольких цилиндров, сделанных из мягкого железа (рис.15). Количество цилиндров ограничивается силой тяжести всей гирлянды.

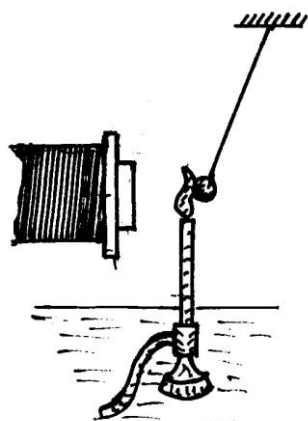


Рис. 13.

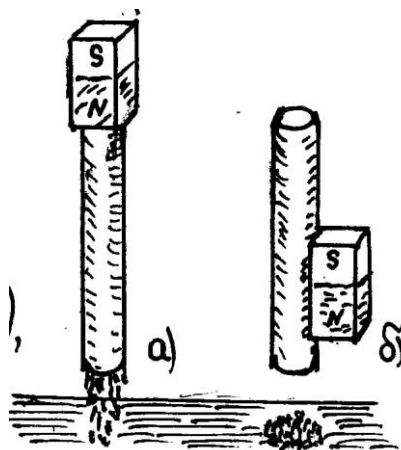


Рис. 14



Рис. 15

Что будет происходить с цилиндрами, если снизу к гирлянде приблизить такой же магнит? Магниты обращены друг к другу одноименными полюсами. Что будет происходить с цилиндрами, если магниты будут обращены друг к другу противоположными полюсами?

8. **Магнитное поле Земли.** Магнитная стрелка компаса, расположенная горизонтально, всегда устанавливается одним концом на географический север Земли, другим – на юг (если вблизи нет магнитов и электрических токов). Этот факт говорит о том, что Земля окружена магнитным полем, то есть Земля – это большой магнит.

Наблюдения за магнитной стрелкой показали, что магнитный и географический полюса не совпадают. Вертикальная плоскость, в которой располагается продольная ось магнитной стрелки, называется плоскостью магнитного меридиана данной точки земной поверхности. Приближаясь к северному географическому полюсу Земли, магнитные линии все больше и больше отклоняются от него и на 71° северной широты и 96° западной долготы делаются вертикальными, входя в Землю. Здесь мы, следовательно, имеем южный магнитный полюс Земли (так как магнитная стрелка направлена северным концом к этой точке).

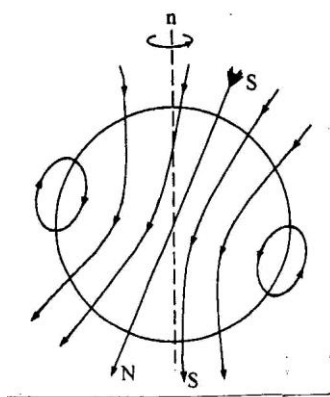


Рис. 16.

Вблизи южного географического полюса магнитные линии выходят из Земли; здесь, следовательно, мы имеем северный магнитный полюс Земли. Линии индукции магнитного поля Земли показаны на рис.16. Какой формы проводник с электрическим током мог бы создать магнитное поле с подобной картиной линий индукции?

9. **Магнитная стрелка плавает в воде.** Если магнитную стрелку прикрепить к пробке и опустить пробку в воду, то под действием магнитного поля Земли стрелка повернется и встанет вдоль магнитного меридиана, но перемещаться к северу или югу не будет. Если недалеко от стрелки поместить какой-либо полюс прямого магнита, то стрелка под действием поля магнита не только повернется по направлению силовых линий, но и начнет двигаться в сторону магнита. Каковы причины различного поведения стрелки в магнитных полях Земли и магнита?

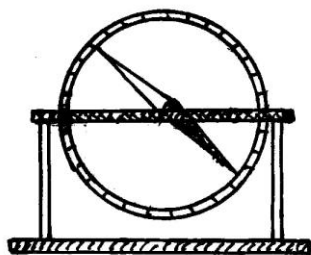


Рис.17.

10. **Магнитная стрелка наклона.** Устройство, которое предназначено для определения направления линии магнитной индукции Земли в вертикальной плоскости, состоит из магнитной стрелки наклона, укрепленной на горизонтальной оси. Для измерения угла наклона стрелки имеется круговая шкала (рис.17).

Как можно с помощью такой стрелки определить направление магнитного меридиана Земли?

11. **Пермалой – специальный магнитный сплав.** Специальный сплав пермалой способен заметно намагничиваться в магнитном поле Земли и, кроме того, не обладает остаточным магнетизмом, то есть является в магнитном отношении очень мягким материалом.

Как будет вести себя магнитная стрелка, укрепленная на вертикальной оси вблизи длинного стержня, сделанного из такого сплава, если:

- а) стержень расположен вертикально;
- б) стержень расположен горизонтально вдоль магнитного меридиана;
- в) стержень расположен в горизонтальной плоскости перпендикулярно к магнитному меридиану.

Будет ли изменяться поведение стрелки в этих трех случаях при перевертывании стержня?

12. **Колебание при помощи магнита.** На нити висит стальной шарик, недалеко на одном уровне с ним установлен прямолинейный магнит. Под действием магнита шарик отклоняется от положения равновесия, находясь на некотором расстоянии от магнита. Как, не касаясь ни шарика, ни магнита и не сдвигая магнит с места, привести шарик в движение, заставить его качаться, подобно маятнику?

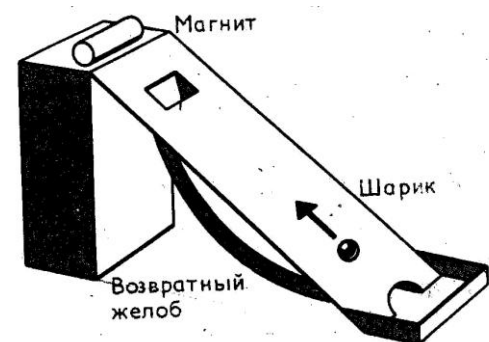


Рис.18

Как, не касаясь ни шарика, ни магнита и не сдвигая магнит с места, привести шарик в движение, заставить его качаться, подобно маятнику?

13. **«Вечное» магнитное движение.** Из множества необычных вечных двигателей, когда-либо придуманных людьми, одним из простейших является двигатель, предложенный в 70-х годах XVII в. Магнит, укрепленный на стойке, должен тянуть железный шарик вверх по наклонной плоскости, пока

тот не поднимется до отверстия вверху (рис.18). Провалившись в отверстие, шарик скатывается вниз по желобу и снова под действием магнита начинает двигаться вверх по наклонной плоскости. Почему же этот двигатель не работает?

14. **Осциллограф и постоянный магнит.** Осциллограф – измерительный прибор для визуального наблюдения электрических сигналов. Наиболее часто осциллограф используют для наблюдения изменений силы тока, напряжения во времени, а также для измерений различных электрических величин: амплитуды тока и напряжения, частоты, сдвига фаз, длительности и частоты электрических импульсов и др. Основным элементом осциллографа является электронно-лучевая трубка.

На экране осциллографа получено изображение какого-либо процесса. К экрану поднесли мощный постоянный магнит. Что произойдет с изображением? Почему?

15. **Короткая катушка и магнит.** Короткая катушка с током свободно висит на мягких подводящих проводах (рис.19). Направление тока в обмотке катушки указано на рисунке стрелкой. К катушке подносят северным полюсом горизонтально расположенный магнит. Что будет происходить с катушкой в этом случае? Что произойдет с катушкой, если к ней подносить магнит южным полюсом?

16. **Катушка с током посередине полосового магнита.** Короткая катушка с током свободно висит на мягких подводящих проводах (см. «Короткая катушка с током и магнит») посередине прямого полосового магнита в нейтральной зоне. Что произойдет с катушкой, если в ней изменить направление тока на обратное?

17. **Два подковообразных магнита.** Два одинаковых подковообразных магнита сложены друг с другом противоположными полюсами так, как показано на рис.20. На один из магнитов надета катушка, концы которой подключены к гальванометру. Если оторвать магниты друг от друга, то в момент отрыва стрелка гальванометра отклонится на некоторый угол. Если же магниты снова соединить, то стрелка гальванометра даст отклонение, но уже в обратную сторону.

Указать причины, вызывающие отклонение стрелки гальванометра.

18. **Взаимно перпендикулярные круговые токи.** Два вертикальных круговых проводника с приблизительно одинаковыми диаметрами расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис.21). Что будет происходить с проводниками, если по ним пропустить токи в направлениях, которые указаны стрелками? Проводники изолированы друг от друга и могут вращаться относительно оси OO' .

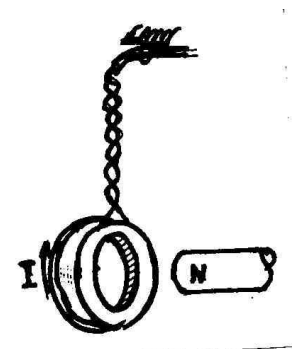


Рис. 19

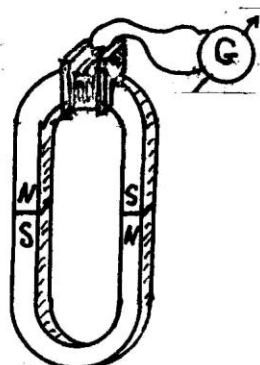


Рис 20

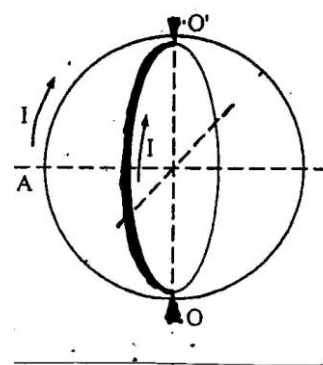


Рис 21

19. **Индукция магнитного поля двух полуколец.** К двум диаметрально противоположным точкам проволочного кольца подведены идущие радиально провода,

соединенные с удаленным источником тока. Чему равна индукция магнитного поля в центре кольца?

20. **Какие токи притягиваются, а какие – отталкиваются?** Если по двум параллельным проводникам пропускать токи в одном направлении, то они притягиваются друг к другу. Если же два параллельных тока будут представлять собой пучки электронов, которые перемещаются в одном направлении, то эти пучки отталкиваются. Почему такое отличие, ведь в обоих случаях речь идет о параллельных токах одного направления?

21. **Токпроводящая резиновая трубка.** Что произойдет с проводящей ток резиновой трубкой, если по ней пропустить постоянный электрический ток?

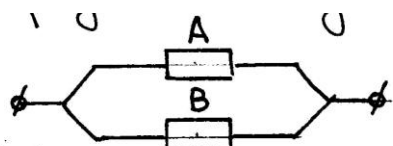


Рис. 22.

22. **Какой проходит ток?** По двум параллельным ветвям электрической цепи передаются одновременно постоянный ток и ток высокой частоты (рис.22). Что необходимо сделать, чтобы по одной ветви (например, ветвь А) проходил только постоянный ток, а по другой – только высокочастотный ток?

23. **Сопротивление ваттметра.** Ваттметр – прибор для измерения электрической мощности, потребляемой из сети электрическими установками. На ваттметре имеются две пары клемм, к которым присоединены обмотки двух катушек - токовой, включенной последовательно с установкой, и обмотки напряжения, подсоединяемой параллельно установке. Обозначения возле клемм стерлись. Как, не вскрывая прибора, определить с помощью двух проводников и карманного фонарика, к каким клеммам присоединены соответствующие обмотки?

24. **Пружина в цепи постоянного тока.** Мягкая спиральная проводящая

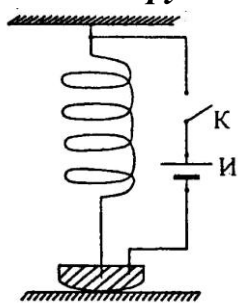


Рис. 23.

пружина, один конец которой закреплен, второй свободно висит. Нижний конец пружины погружен в чашечку с ртутью. Пружина и чашечка подключены к источнику постоянного тока И, как показано на рис.23. Что будет происходить с пружиной после замыкания цепи ключом К?

25. **Катушки индуктивности и лампочка накаливания.**

Электрическая цепь, состоящая из двух катушек индуктивности и лампочки накаливания, подключена к источнику переменного тока. Электрическая цепь была собрана таким образом, что если в одну из катушек вдвигать стальной сердечник, то свечение лампочки усиливается, если же сердечник вдвигать в другую катушку, то свечение лампочки ослабляется. Какова должна быть схема возможной электрической цепи?

26. **Магнитное поле внутри тонкостенной трубы.** Вдоль

очень длинной прямолинейной тонкостенной трубы течет ток силы I . Радиус трубы R . Ток равномерно распределяется по всему сечению трубы. Чему равна индукция магнитного поля внутри трубы?

27. **Индукция внутри коаксиального кабеля.** Ток силы I течет вверх по внутреннему проводу коаксиального кабеля (рис.24) и возвращается по внешней оболочке кабеля.

Чему будет равна индукция магнитного поля в точках, лежащих внутри кабеля?

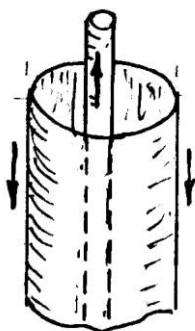


Рис. 24

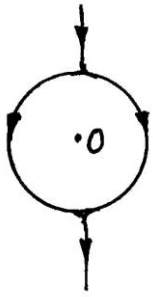


Рис. 25

28. **Взаимодействие разветвления цепи и магнита.** В цепи постоянного тока имеется кольцообразное разветвление из однородного проводника (рис.25). Какая сила будет действовать со стороны магнитного поля токов в разветвлении на магнитный полюс, помещенный в центре этого разветвления?

29. **Две одинаковые катушки с разными свойствами.** На двух катушках одинакового диаметра намотан изолированный провод. Катушки включаются поочередно в электрическую цепь. При этом одна из катушек обнаруживает магнитные свойства – притягивает пластинку, вторая – нет, хотя амперметр показывает, что и через нее проходит ток. Катушки намотаны одинаковым проводом, имеют равные размеры и равное число витков, обе не имеют сердечника. Чем объяснить странное поведение второй катушки?

30. **Две катушки и магнит.** Электромагнит притягивает к полюсу железные предметы. Один полюс электромагнита будет действовать слабее двух. Поэтому при

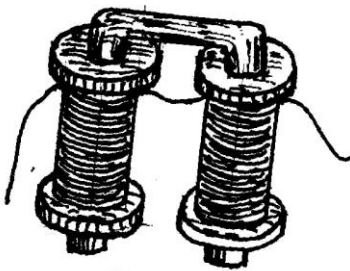


Рис. 26

изготовлении электромагнита необходимо насадить две катушки на прямой стержень. Для использования силы обоих полюсов электромагнита придают ему подковообразную форму (рис.26). Однако может случиться, что такой электромагнит, включенный в цепь постоянного тока, не будет притягивать железный стержень, касающийся обоих полюсов. Таким образом, один полюс электромагнита притягивает куски железа, а два – не притягивают. Отчего так может произойти?

31. **Движение пузырька в магнитном поле.** Если поднести к плотницкому пузырьковому уровню большой магнит, пузырек сдвинется. Почему? В какую сторону сдвинется пузырек: к магниту или от него?

32. **Электронный пучок фокусируется магнитным полем.** Электронно-лучевая трубка с ускоряющим напряжением U помещена в однородное магнитное поле с индукцией B , направленной вдоль оси трубки. На экране при этом наблюдается расплывчатое пятно. Если менять величину индукции, то можно заметить, что при некоторых значениях $B_0, 2B_0, 3B_0, \dots$ электронное пятно фокусируется – собирается в точку. Объясните это явление. Как с помощью такого эксперимента определить удельный заряд (отношение заряда к его массе)?

33. **Соленоид с железным сердечником.** Внутри соленоида, по которому течет ток, создаваемый источником с постоянной электродвижущей силой, находится железный сердечник (рис. 27). Как изменится ток в контуре во время удаления сердечника – увеличится, уменьшится или останется неизменным?

34. **ЭДС самоиндукции.** Через две одинаковые катушки индуктивности текут токи, изменяющиеся во времени по линейному закону (рис.28). В какой из катушек индуктивности возникающая ЭДС самоиндукции больше? Изменяется ли значение или знаки ЭДС самоиндукции, когда токи, пойдя через нуль, начнут возрастать в противоположном направлении, сохраняя тот же линейный закон?

35. **Материал для сердечников.** Два сорта стали при намагничивании характеризуются гистерезисными кривыми, приведенными на рис.29, а,б. Какой из этих сортов лучше использовать для изготовления сердечников трансформатора и какой – для изготовления постоянного магнита?

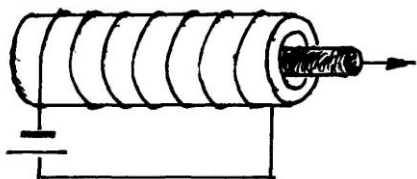


Рис. 27.

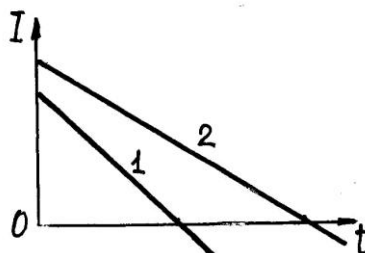


Рис. 28

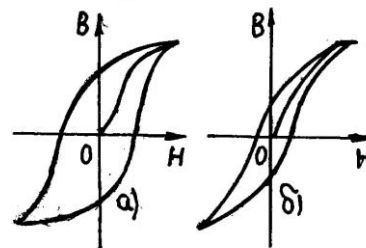


Рис. 29

36. **Какой ток питает электрическую лампочку?** Электрическая лампочка может питаться от источника постоянного или переменного тока. Как с помощью сильного магнита (лучше подковообразного) определить, к какому источнику тока присоединена лампочка – переменному или постоянному?

37. **Движение электрона в магнитном поле.** Если электрон влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно силовым линиям, то он начинает двигаться по окружности определенного радиуса. После наступления установившегося движения индукция магнитного поля начинает медленно возрастать. Уменьшится или увеличится радиус кривизны траектории в этом случае?

38. **Энергия заряженной частицы в магнитном поле.** Заряженная частица движется в однородном магнитном поле. Может ли эта частица увеличить свою энергию за счет энергии поля?

39. **Короткий проводник в магнитном поле бесконечного проводника.** Возле очень длинного (бесконечного) прямолинейного проводника АВ с током, который закреплен (неподвижен), расположен подвижный, однородный, прямолинейный проводник CD конечной длины так, что он лежит целиком по одну сторону от АВ в плоскости, проходящей через АВ (рис.30). Проводник CD перпендикулярен проводнику АВ. Направление токов в проводниках АВ и CD указано стрелками. Что будет происходить с проводником CD, если по нему пропустить ток?

40. **Скрещенные под прямым углом проводники.** По двум свободным, скрещивающимся под прямым углом прямолинейным проводникам пропускают токи (рис.31). Как в результате взаимодействия магнитных полей токов будет изменяться расположение проводников друг относительно друга?

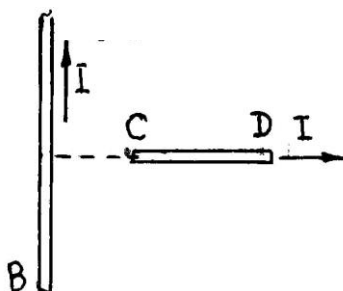


Рис. 30

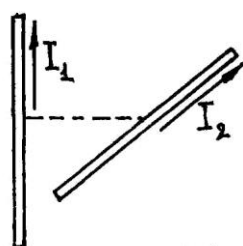


Рис 31

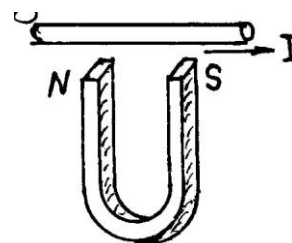


Рис 32

41. **Проводник с током над полюсами магнита.** Прямолинейный провод с током расположен над полюсами подковообразного магнита, как показано на рис.32.

Провод может свободно перемещаться во всех направлениях. Что будет происходить с проводом под действием поля магнита, если ток идет в направлении, указанном стрелкой?

42. **Взаимодействие кругового тока и проводника.** Прямолинейный ток I_1 проходит вдоль оси кругового тока I_2 (рис.33). С какой силой взаимодействуют эти токи?

43. **Гибкий проводник около прямолинейного магнита.** Сильный длинный цилиндрический прямолинейный магнит расположен вертикально так, что северный полюс находится вверху, а южный – внизу. Около магнита помещают гибкий свободно висящий провод (рис.34). Как расположится проводник, если по нему пропустить ток, направленный сверху вниз?

44. **Взаимодействие катушек с током.** Две катушки, по которым текут токи, взаимодействуют между собой с некоторой силой. Как изменится эта сила, если обе катушки свободно надеть на общий замкнутый железный сердечник (рис.35)?

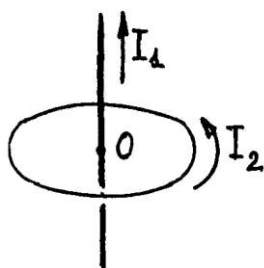


Рис. 33

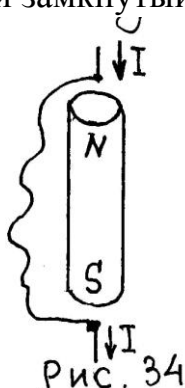


Рис. 34

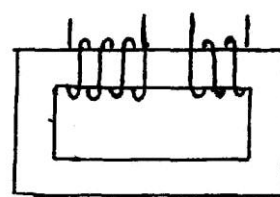


Рис. 35

45. **Движение электрона вдоль плоской границы двух магнитных полей.** Пространство разделено плоской границей на две плоскости. В одной плоскости создано магнитное поле с индукцией B_1 , в другой – с индукцией B_2 , причем поля однородные и параллельны друг другу. С поверхности раздела перпендикулярно к плоскости раздела и силовым линиям магнитного поля стартует электрон со скоростью v в сторону области с индукцией поля B_1 ($B_2 > B_1$). Опишите движение и скорость дрейфа электрона вдоль границы раздела полей.

46. **Движение электрона вдоль границы раздела электрического и магнитного полей.** Области однородных магнитного и электрического полей разделены границей – плоскостью. Магнитное поле с индукцией B параллельно плоскости раздела. Электрическое поле с напряженностью E перпендикулярно плоскости раздела. В электрическое поле на расстоянии l от границы помещается частица массой m с зарядом q . Нарисуйте траекторию этой частицы. Найдите скорость дрейфа частицы вдоль проникаемой для нее границы раздела полей.

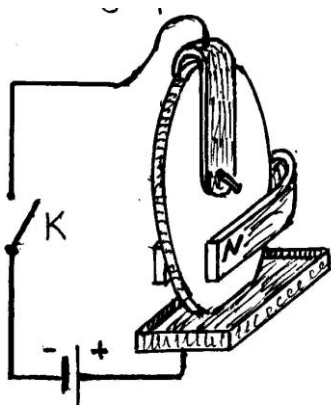


Рис. 36

47. **Медный диск в магнитном поле.** Медный диск укреплен на горизонтальной оси и помещен между полюсами сильного подковообразного магнита так, что северный полюс магнита расположен справа (рис.36). Нижний край диска погружен в чашечку с ртутью. Ось диска и ча-

щечка подключены к источнику постоянного тока (на оси отрицательный потенциал, на чашечке – положительный).

Что будет происходить с диском при замыкании цепи и почему?

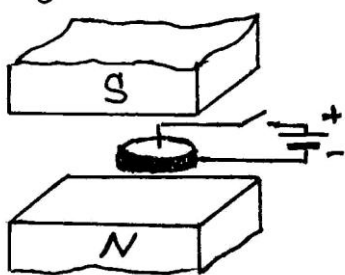


Рис. 37

48. **Раствор медного купороса между полюсами магнита.** Широкий круглый стеклянный сосуд с раствором медного купороса находится между полюсами сильного электромагнита (рис.37). В центре сосуда в раствор погружен медный электрод, соединенный с положительным полюсом источника тока, а по периметру погружено медное кольцо, соединенное с отрицательным полюсом. Что произойдет при замыкании цепи?

49. **Электrolампочка с последовательно включенной катушкой.** Последовательно с электрической лампочкой накаливания подключена к источнику постоянного тока длинная катушка (соленоид). Как будет меняться накал нити лампочки, если в катушку медленно вводить железный сердечник?

50. **Проводник, сложенный вдвое.** Прямой изолированный проводник посередине складывают вдвое и концы присоединяют к гальванометру. Образуется своеобразный замкнутый контур, который перемещают так, что проводники пересекают линии индукции магнитного поля. Кажется бы, есть все предпосылки для возникновения ЭДС индукции в контуре, однако стрела гальванометра остается на нуле. В чем причина отсутствия ЭДС индукции в контуре?

51. **Магнит и медное кольцо.** Медное кольцо, подвешенное на шелковой нити, расположено в вертикальной плоскости. Сквозь него в горизонтальном направлении вдвигают один раз постоянный магнит, в другой раз – железный стержень. Размеры и форма магнита и стержня одинаковы. Повлияет ли движение стержня и магнита на положение медного кольца?

52. **Падение магнита в медное кольцо.** Прямой постоянный магнит падает сквозь медное кольцо, расположенное в горизонтальной плоскости. Будет ли падать магнит при прохождении через кольцо с ускорением свободного падения?

53. **Медное кольцо падает на магнит.** На два одинаковых постоянных полюсовых магнита, расположенных вертикально, падают одинаковые медные кольца – одно сплошное, а другое – имеющее разрыв. Какое кольцо упадет быстрее и почему?

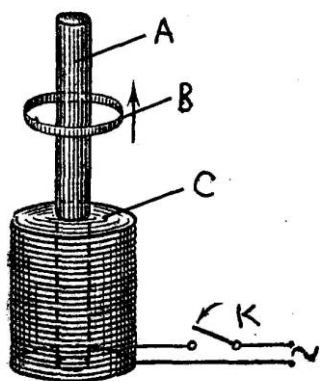


Рис. 38

54. **Электромагнитное «парение».** Выдающийся английский физик Уильям Томсон, один из основоположников термодинамики, плодотворно работал в области изучения электрических и магнитных явлений. Изучая магнитные свойства проводников, по которым пропускался электрический ток, Томсон проделал следующий опыт. На железный сердечник А была намотана катушка С из большого числа витков медного провода. На сердечник свободно надето массивное кольцо В из хорошо проводящего материала (медь). При помощи ключа К катушка подключалась к цепи переменного тока (рис.38). В момент включения кольцо подсакивало и затем спокойно висело в воздухе.

Почему кольцо ведет себя по-разному в момент включения и при неизменном токе? Что удерживает кольцо во взвешенном состоянии и чем определяется высота, на которой оно висит? Насколько устойчиво положение кольца (вернется ли оно назад, если его сдвинуть с места или наклонить)? На одной ли высоте повиснут тонкое и толстое кольца, если их диаметры и плотности одинаковы? Что случится, если медленно увеличивать ток в катушке, на которую надеты кольца? Как будут вести себя кольца, если диаметр одного из них окажется больше, чем другого? Будет ли подсакивать кольцо, если включить катушку в цепь постоянного тока?

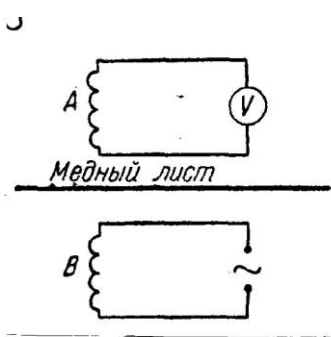


Рис. 39

55. **Медный лист между катушками.** Две одинаковые катушки располагаются соосно одна над другой (рис.39). Катушка А замкнута на вольтметр, а катушка В подключена к источнику переменного тока. Переменный ток в катушке В приводит к возникновению индукционного тока в катушке А. Как изменится напряжение, индуцируемое в катушке А током, идущим в катушке В, если между катушками положить большой медный лист?

56. **ЭДС индукции во вращающейся рамке.** Около достаточно длинного прямолинейного проводника с током вращается с постоянной скоростью прямоугольная рамка (рис.40). Ось вращения OO' проходит через одну из сторон рамки и параллельна проводнику с током. При каких положениях рамки возникающая в ней ЭДС индукции будет наибольшей и наименьшей?

57. **Вращение диска в «тени» магнитного поля.** Над катушкой электромагнита, через которую пропускают переменный ток с неизменной амплитудой, поместили свободно вращающийся на оси медный диск (рис.41). Диск будет отталкиваться от магнита, но не придет во вращение. Если вставить между диском и магнитом медный диск, тем самым частично экранируя диск от магнитного поля, то диск начнет вращаться. Почему?

58. **Будет ли возникать индукционный ток?** Два круговых проводника расположены перпендикулярно друг другу (рис.42). По одному из круговых проводников (по проводнику В) пропускают ток. Возникает ли индукционный ток в другом круговом проводнике А, если в проводнике В изменять величину тока?

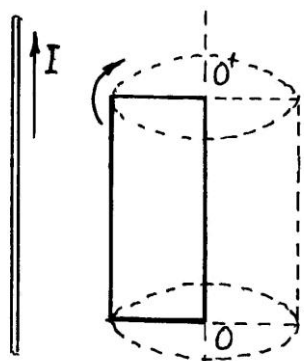


Рис. 40



Рис. 41

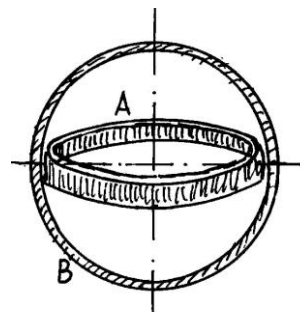


Рис. 42

59. **Катушка с медным и ферритовым сердечником в колебательном контуре.** Колебательный контур состоит из конденсатора и катушки, в которую может вдвигаться сердечник. Один сердечник спрессован из порошка магнитного соедине-

ния железа (феррита) и является изолятором. Другой изготовлен из меди. Как изменится частота собственных колебаний контура, если в катушке один раз вдвигать медный сердечник, а другой раз – сердечник из феррита?

60. **Что покажет гальванометр?** По двум параллельным металлическим стержням (1 и 2), лежащим в горизонтальной плоскости относительно Земли, равномерно перемещается проводящий стержень (3). С противоположной стороны стержни (1 и 2) замкнуты на гальванометр (рис.43) (гальванометр – высокочувствительный измерительный прибор, предназначенный для измерений очень малых сил тока, напряжений и количества электричества. Большинство современных гальванометров относятся к приборам магнитоэлектрической системы). Будут ли изменяться показания гальванометра

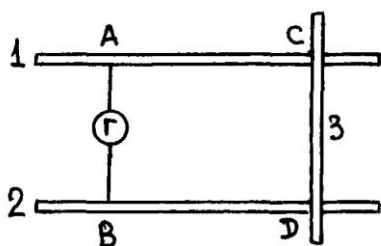


Рис. 43

в зависимости от того, приближается стержень к гальванометру или удаляется от него (в обоих случаях стержень 3 находится по одну сторону от гальванометра)?

61. **Какой переносится заряд?** В короткозамкнутую катушку сначала быстро, а затем медленно вдвигают магнит. Одинаковый ли заряд переносится при этом возникающим в катушке индукционным током? Одинаковое ли количество теплоты выделяется в катушке?

62. **Разность потенциалов на крыльях самолета.** В любом проводнике, когда он движется в магнитном поле так, что его скорость v перпендикулярна к его собственной длине l и к магнитной индукции B , или, короче, когда он пересекает линии индукции магнитного поля, на концах этого проводника возникает разность потенциалов $\Delta\varphi = vBl$. То же самое происходит с самолетом при его движении в магнитном поле Земли (см. «Магнитное поле Земли»); на концах крыльев (своеобразный проводник) самолета возникает разность потенциалов.

Если самолет летит вдоль магнитного меридиана, будут ли одинаковы потенциалы концов крыльев самолета? Изменится ли разность потенциалов, если самолет будет лететь по какому-либо другому направлению с той же по величине скоростью?

Два одинаковых самолета летят горизонтально с одинаковыми скоростями, один вблизи экватора, другой – у полюса. У какого из них возникает большая разность потенциалов на крыльях?

63. **Трансформатор.** Электрический трансформатор – устройство, преобразующее переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения (при неизменной частоте). Трансформатор состоит из замкнутого стального сердечника – магнитопровода 2, на котором располагаются две или несколько обмоток, не имеющих между собой электрического контакта (рис.44). Обмотка 1, к которой подводится переменный электрический ток, называется первичной; обмотка 3, к которой подключаются потребители электроэнергии 4 («нагрузка»), – вторичной. Магнитопровод собирается из листов электротехнической стали толщиной от 0,35 до 0,5 мм. Листы изолируются друг от друга тонкой бумагой или лаком.

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. Под действием переменного напряжения и, соответственно, переменного тока, в первичной обмотке возбуждается переменный магнитный поток, который концентрируется в сердечнике из трансформаторной стали. Переменный магнитный поток

наводит в первичной и вторичной обмотках ЭДС, которые пропорциональны числу витков. Поэтому если во вторичной обмотке число витков меньше, чем в первичной,

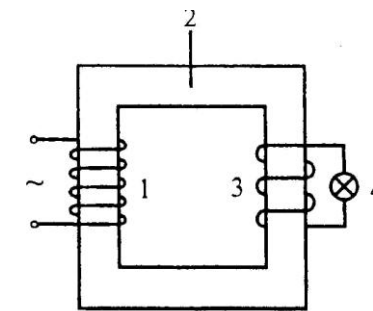


Рис. 44.

то со вторичной обмотки снимается меньшее напряжение, чем подается на первичную обмотку (понижающий трансформатор). Если число витков во вторичной обмотке больше, чем в первичной обмотке, то со вторичной обмотки снимается большее напряжение (повышающий трансформатор).

Напряжение во вторичной обмотке трансформатора меняется, а как изменяется сила тока? Что произойдет, если трансформатор подключить к источнику постоянного тока? Зачем сердечник трансформатора собирают из отдельных пластин?

64. **Напряжение на вторичной обмотке трансформатора.** Ток в первичной обмотке трансформатора равномерно увеличивается. По какому закону меняется напряжение на вторичной обмотке?

65. **Сколько витков в обмотках трансформатора?** В трансформаторе две обмотки надеты на замкнутый стальной сердечник. Число витков в обмотках неизвестно. Как определить число витков в каждой из обмоток, если в распоряжении имеются источник переменного тока, провода и вольтметры любой чувствительности?

66. **Почему выходит из строя трансформатор?** Почему опасно замыкание хотя бы одного витка вторичной обмотки накоротко? Замыкание витка вторичной обмотки приводит иногда к выходу из строя первичной обмотки трансформатора. Почему это происходит?

67. **Шум в трансформаторах.** В трансформаторах большой мощности при работе под нагрузкой появляются различные шумы и гул. Почему нагруженный трансформатор гудит? Какова основная частота звука, если трансформатор включен в промышленную сеть с частотой 50 Гц?

68. **Кнопка электрического звонка.** Для питания электрического звонка пользуются понижающим трансформатором. Почему обычно кнопка звонка включена во вторичную обмотку, а первичная остается постоянно подключенной к сети?

69. **Трансформатор при постоянном токе.** Трансформатор, рассчитанный на переменный ток напряжением 127 В, подключают в сеть постоянного тока с напряжением 110 В. Что произойдет с трансформатором?

70. **Асинхронный двигатель.** Асинхронный трехфазный двигатель (рис.45) состоит из двух главных частей: неподвижного статора (1) и вращающегося ротора (2). Статор электродвигателя набирается из отдельных частей пластин, имеющих форму колец, которые изолированы друг от друга и образуют конструкцию цилиндрической формы с пазами на внутренней стороне. В пазы укладываются обмотки.

Ротор электродвигателя тоже набирается из стальных круглых пластин, которые закрепляются на валу. На внешней поверхности цилиндрического ротора имеются пазы, в которые укладываются медные стержни. Стержни соединяются друг с другом медными кольцами, образуя своеобразную обмотку, напоминающую беличье колесо.

Обмотка статора трехфазного асинхронного электродвигателя в простейшем случае состоит из трех катушек, смещенных друг относительно друга на 120° . По

этим трем обмоткам (катушкам) статора проходят токи, которые образуют три переменных магнитных поля. Результирующее (суммарное) магнитное поле при прохождении трехфазного тока по обмоткам статора, вращается в плоскости осей катушек с угловой скоростью, соответствующей частоте переменного тока, когда обмотка статора состоит из трех катушек. Для частоты переменного тока 50 Гц угловая скорость вращения равна 3000 оборотов в секунду.

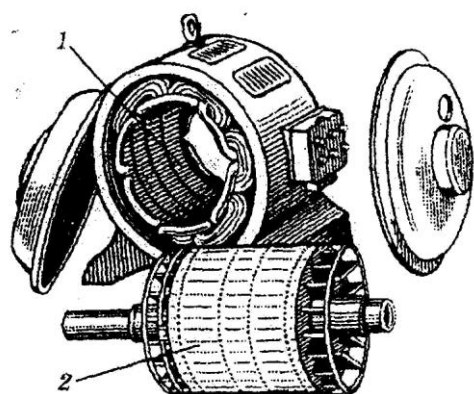


Рис. 45

Вращающий момент двигателя создается силами взаимодействия вращающегося магнитного поля статора и токов, индуцируемых им в роторе. Скорость вращения ротора электродвигателя не может достигать скорости вращения магнитного поля. Вращающий момент, действующий на ротор, определяется силой тока (или соответствующей ЭДС), индуцируемого в роторе. А индуцируемая в роторе ЭДС определяется скоростью вращения поля по отношению к скорости вращения ротора, который вращается в ту же сторону, что и поле. Значит, если бы ротор вращался с той же скоростью, что и поле, то он находился бы в покое относительно поля, в нем не возникала бы ЭДС индукции. В роторе не было бы тока и не мог бы возникнуть вращающий момент. Отсюда становится ясно, что двигатель может работать только при частоте вращения ротора несколько меньшей частоты вращения поля. Поэтому такие двигатели и называют асинхронными.

Почему ротор и статор электродвигателя не делают сплошными, а, наоборот, из отдельных пластин, изолированных друг от друга? Почему электродвигатель может сгореть, если остановить его ротор?

71. **Быстрая остановка трамвая.** На проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует сила, которую опытным путем обнаружил французский физик А.Ампер. Сила Ампера, действующая на участок проводника, по которому течет ток, пропорциональна силе тока, длине проводника и индукции внешнего магнитного поля. Эта сила используется во многих технических устройствах, в частности в электродвигателях постоянного тока. По обмотке вращающейся части двигателя якоря (рис.46) протекает постоянный электрический ток. Мощные магниты 4 создают магнитное поле, которое действует на проводники с током в обмотке якоря и заставляет их двигаться. Коллектор 2 и щетки 1 обеспечивают такое направление тока в обмотке, чтобы магнитное взаимодействие создавало вращающий момент, приводящий к непрерывному вращению якоря.

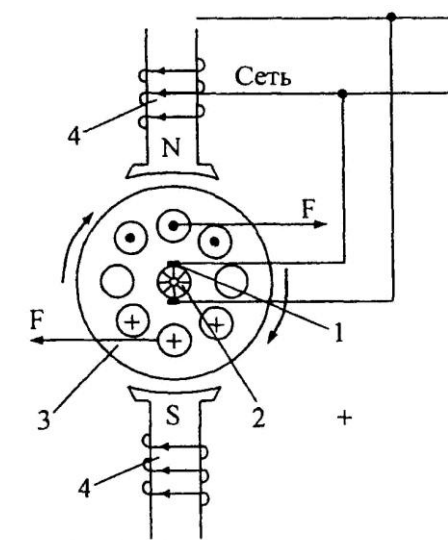


Рис. 46.

Электродвигатели постоянного тока позволяют плавно и в широких пределах изменять угловую скорость, вследствие чего они получили широкое распространение на электрофицированном транспорте, в прокатных станах, в крупных экскаваторах, в устройствах автоматики.

Электродвигатель постоянного тока может работать также в режиме генератора для получения постоянного тока. В этом случае при вращении якоря в его обмотке происходит индуцирование ЭДС в магнитном поле, которое создают мощные электромагниты 4.

Если водитель трамвая или троллейбуса, на которых применяются электродвигатели постоянного тока, на полном ходу выключит напряжение на входных клеммах мотора и соединит их накоротко, то произойдет быстрая остановка. Чем это объясняется?

72. *Автомобильный спидометр.* Магнит не притягивает алюминий, медь и другие цветные металлы, однако можно заставить магнитом вращаться тонкий алюми-

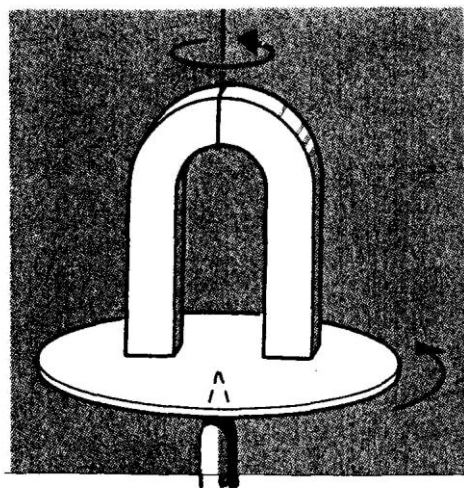


Рис. 47.

ниевый диск. Для этого над горизонтально расположенным диском, имеющим ось вращения, в центре подвешивается на прочной нити подковообразный магнит (рис.47). Если теперь раскрутить магнит, то диск начнет вращаться. Почему диск начинает вращаться и будет ли он вращаться в ту же сторону, что и магнит?

Примерно так же работает спидометр автомобиля, с той лишь разницей, что в автомобильном спидометре вращающийся магнит находится внутри круглой алюминиевой коробки, к которой прикреплены стрелка и пружинка; коробка не вращается, так как ее удерживает пружинка.

Вращается так же с магнитном поле алюминиевый диск в счетчике электрической энергии.

III. Подсказки

1. У намагниченного стержня имеется северный и южный полюса, которые притягивают стальной ненамагниченный стержень, в середине между полюсами находится нейтральная зона, которая не притягивает.
2. Пластина В часть магнитного поля «забирает» на себя.
3. Одноименные полюса магнита и намагниченного тела отталкиваются, а разноименные притягиваются.
4. Магнитное поле магнита намагничивает железную проволочку; при нагревании намагниченное тело размагничивается.
5. Электромагнит притягивает стальной шарик, который, попадая в пламя горелки, размагничивается.
6. Приложенный сбоку к железному стержню магнит замыкает накоротко силовые линии внутри стержня.
7. Смотри подсказку № 3.
8. Необходимо рассмотреть магнитные линии кольцевого тока.
9. Магнитное поле Земли в любой точке пространства практически однородное, а поле магнита неоднородное.
10. Магнитная стрела, вращающаяся в вертикальной плоскости, перпендикулярной магнитному меридиану, занимает вертикальное положение.
11. Пермалой легко намагничивается магнитным полем Земли.
12. Железный предмет экранирует магнитное поле.
13. Магнитное поле действует на шарик только в одном направлении.
14. Магнитное поле действует на движение электронов.
15. Катушка с током взаимодействует с постоянным магнитом.
16. При изменении направления тока меняется направление магнитного поля.
17. В момент отрыва магнитов друг от друга в каждом из них уменьшается количество силовых линий магнитного поля.
18. Проводники, в которых направление токов совпадает, притягиваются.
19. Проводники, подключенные к проводящему кольцу, делят кольцо на два одинаковых полукольца, каждое из которых создает магнитное поле.
20. Вокруг проводников с током возникают только магнитные поля, а вокруг пучков электронов – и магнитные, и электрические поля.
21. Параллельные токи одного направления притягиваются.
22. Конденсатор не пропускает постоянный ток, но пропускает переменный.
23. Сопротивление токов катушки очень маленькое, а сопротивление обмотки напряжения очень большое.
24. При пропускании тока вокруг витков пружины возникают магнитные поля, посредством которых происходит взаимодействие между витками.
25. Когда сердечник вставляется в катушку, ее сопротивление увеличивается.
26. Ток по трубе можно представить как сумму одинаковых линейных параллельных токов.
27. Внешняя оболочка коаксиального кабеля может выполнять роль экрана.
28. Индукция в центре кольцеобразного разветвления равна нулю.
29. На одной катушке бифилярная оболочка.
30. Катушки неправильно включены в цепь.

31. Пузырьковый уровень наполнен диамагнитной жидкостью.
32. Электроны двигаются по винтовой линии.
33. ЭДС самоиндукции имеет такое направление, чтобы препятствовать изменению причины, вызывающей эту ЭДС.
34. ЭДС самоиндукции пропорциональна скорости изменения тока.
35. При перемагничивании стали выделяется теплота, измеряемая площадью гистерезисной петли.
36. В магнитном поле на проводник с током действует сила Ампера, направление которой зависит от направления тока.
37. Сила Лоренца меняется быстрее, чем скорость электрона.
38. На заряженную частицу в магнитном поле действует сила Лоренца перпендикулярно к направлению перемещения.
- 39, 40. На проводник с током действует сила Ампера в магнитном поле, которое создает другой проводник с током.
41. Магнитное поле магнита действует на проводник с током.
42. Силовые линии магнитного поля прямого проводника с током представляют собой концентрические окружности.
43. На верхние и нижние участки провода с током действует сила Ампера.
44. На сильное магнитное поле в сердечнике магнитное поле катушек не влияет.
45. На заряженную частицу в магнитном поле действует сила Лоренца, которая приводит к вращательному движению частицы.
46. В магнитном поле частицы движется по окружности, а в электрическом поле – по прямой с ускорением.
47. В медном диске от края диска к оси в радиальном направлении протекает ток, на который действует магнитное поле.
48. На отрицательные и положительные ионы при протекании тока будут действовать силы Лоренца.
49. При введении сердечника в катушку в ней возникает ЭДС индукции.
50. В замкнутых половинках проводника возникают ЭДС индукции, имеющие противоположные направления.
51. При изменении магнитного поля в замкнутом контуре возникает индукционный ток.
52. При движении магнита сквозь металлическое кольцо в кольце будет возникать ЭДС индукции.
53. В замкнутом кольце в переменном магнитном поле возникает ЭДС индукции, а в кольце с разрывом – не возникает.
54. В кольце возникает индукционный ток противоположного направления.
55. В медном листе переменное магнитное поле будет создавать индукционные токи Фуко.
56. ЭДС индукции зависит от скорости изменения магнитного потока.
57. Индукционные токи в диске и медной пластинке имеют одинаковое направление.
58. Индукционный ток в контуре возникает, если магнитный поток, пронизывающий контур, меняется во времени.
59. Медь ослабляет магнитное поле, а феррит – усиливает.
60. ЭДС индукции зависит от скорости изменения магнитного потока.

61. Протекающий в короткозамкнутой катушке заряд определяется величиной изменения магнитного потока, а количество теплоты – силой индукционного тока.
62. Разность потенциалов на концах крыльев самолета зависит от величины вертикальной составляющей индукции магнитного поля Земли.
63. Мощность, потребляемая первичной обмоткой трансформатора из сети, за исключением малых потерь, передается на нагрузку вторичной обмотки. В массивных проводниках возникают мощные вихревые токи.
64. Напряжение на вторичной обмотке трансформатора определяется числом витков в обмотке.
65. Необходимо использовать дополнительную обмотку с известным числом витков.
66. В короткозамкнутом витке возникает большая сила тока.
67. Шум в трансформаторах обусловлен магнитострикцией материала сердечника и вибрацией обмоток.
68. При холостом ходе трансформатор из-за большого индукционного сопротивления энергию из сети не потребляет.
69. У трансформатора ничтожно малое активное (омическое) сопротивление катушек.
70. При переменном магнитном поле в проводниках возникают вихревые токи. При остановке ротора возникают большие токи в статоре.
71. Индукционный ток по правилу Ленца имеет такое направление, чтобы препятствовать изменению причины, вызывающей этот ток.
72. При вращении магнита возникает переменное магнитное поле в алюминиевом диске.

IV. Ответы

1. Если в магнитное поле поместить стальной стержень, то происходит его намагничивание. В результате намагничивания на концах стержня появляются два полюса – северный и южный, которые могут притягивать стальные и железные предметы, в середине образуется нейтральная зона, которая не притягивает.

Если имеется два стержня, один из которых намагничен, а другой – нет, узнать, какой намагничен, можно следующим образом. Необходимо прикоснуться концом одного стержня к середине другого (в виде буквы Т). Если стержень, которым прикасаемся, не притягивается, то мы прикасаемся к нейтральной зоне намагниченного стержня.

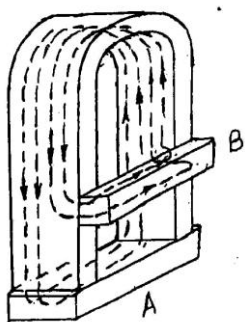


Рис. 48

2. Если прикасаемся сбоку пластиной В к полюсам магнита (рис.10), то часть силовых линий накоротко замыкается через эту пластинку (рис.48); число силовых линий, пронизывающих пластинку А, резко уменьшается. Поэтому уменьшается сила взаимодействия между магнитом и пластинкой А, и она падает. Если пластинку В убрать, то магнитное поле, действующее на пластинку А, восстанавливается и она вновь будет удерживаться магнитом.

3. Когда магнит подносится снизу к висящим вертикально стальным иголкам, то иголки намагничиваются и магнит создает в их нижних концах одноименные магнитные полюса, которые отталкиваются друг от друга и иголки расходятся. Когда магнит приблизится на достаточно малое расстояние, взаимодействие между ним и каждой из иголок станет больше, чем взаимодействие между иголками, и они опустятся, притягиваясь к магниту.

После удаления магнита иголки снова разойдутся за счет остаточного намагничивания.

4. Часть верхушки, под которой находится горелка с сильным пламенем, накаляется докрасна, остальная часть не успевает раскалиться вследствие соприкосновения ее с воздухом. Накаленное железо при 770°C не притягивается магнитом. Магнит притягивает ближайшую к нему ненагретую проволочку вертушки, которая затем попадает в пламя горелки и теряет свои магнитные свойства, магнитное взаимодействие между ней и магнитом прекращается. Далее магнит притягивает следующую ненагретую и потому сильно намагничивающуюся проволочку, явление повторяется и т.д. В результате возникает непрерывное вращение вертушки, причем накаленная часть будет все время охлаждаться вследствие соприкосновения с воздухом.

5. При некоторой достаточно высокой температуре (770°C) сталь теряет свои магнитные свойства и начинает вести себя, как любое другое немагнитное вещество (медь, стекло и др.). При нагревании шарика в пламени горелки до этой температуры сила взаимодействия магнита и шарика резко уменьшается, шарик возвращается в начальное положение, выходит из пламени и остывает. После остывания магнитные свойства шарика восстанавливаются, силы взаимодействия между ним и магнитом увеличиваются и он снова притягивается к магниту, то есть наблюдаются периодические колебания стального шарика.

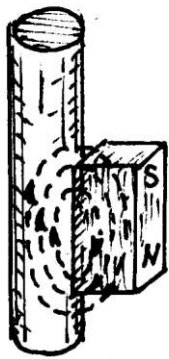


рис. 49.

6. Когда магнит прикладывается к железному стержню сбоку, большая часть силовых магнитных линий замыкается накоротко внутри прилегающей к магниту части стержня (рис.49), и поэтому стержень не может так же сильно намагничиваться, как в случае, когда магнит приложен к верхнему концу стержня. В результате железные опилки стержнем не притягиваются.

7. В первом случае, когда магниты обращены друг к другу одноименными полюсами, по мере приближения нижнего магнита, цилиндры один за другим будут отрываться от гирлянды и притягиваться к нижнему магниту. Оторвется и последний цилиндр, хотя, казалось бы, силы, действующие на него, одинаковы. Дело в том, что на цилиндр действует сила тяжести, направленная в сторону нижнего магнита.

Во втором случае, когда магниты обращены друг к другу противоположными полюсами, при приближении нижнего магнита прочность гирлянды будет возрастать. Когда второй магнит вплотную приблизится к нижнему цилиндру, то он притянется к гирлянде и останется висеть на ней.

8. Картину, подобную линиям индукции магнитного поля Земли, можно получить с помощью кольцевого тока, текущего в плоскости, близкой к экватору.

9. Магнитное поле Земли на расстояниях, равных длине магнитной стрелки, практически однородное, то есть индукция его остается постоянной по величине и направлению. Поэтому магнитное поле Земли, действуя на магнитную стрелку, может создать только вращающие моменты, но не может создать равнодействующей силы, отличной от нуля.

Поле постоянного магнита на расстояниях, равных длине стрелки, неоднородно, сильно меняется. Индукция поля у одного конца стрелки оказывается больше, чем у другого. Поэтому поле магнита при действии на стрелку создает равнодействующую силу, не равную нулю, и она вызывает не только вращение, но и поступательное движение стрелки (притяжение к магниту).

10. Если магнитную стрелку расположить в плоскости, перпендикулярной магнитному меридиану, то она займет вертикальное положение. Поэтому для определения направления магнитного меридиана Земли следует, постепенно поворачивая прибор вокруг вертикальной оси, найти такое положение, при котором стрелка будет вертикальна. В этом случае направление магнитного меридиана будет совпадать с направлением оси вращения стрелки.

11. Когда стержень из пермалоя расположен вертикально, а магнитная стрелка вращается в горизонтальной плоскости, то происходит следующее. За счет действия вертикальной составляющей магнитного поля Земли стержень намагничивается и магнитная стрелка при приближении к его концам будет притягиваться к нему.

Если стержень расположен горизонтально вдоль магнитного меридиана, он намагничивается за счет горизонтальной составляющей магнитного поля Земли. Магнитная стрелка будет всегда поворачиваться в сторону ближайшего к ней конца стержня.

Если стержень будет расположен горизонтально перпендикулярно к магнитному меридиану, то он не будет намагничиваться магнитным полем Земли и магнитная стрелка не будет изменять своего положения при приближении стержня.

Если стержень будет расположен горизонтально перпендикулярно к магнитному меридиану, то он не будет намагничиваться магнитным полем Земли и магнитная стрелка не будет изменять своего положения при приближении стержня.

Во всех трех случаях предполагается, что при приближении магнитной стрелки к стержню расстояние между ними остается еще настолько большим, что можно пренебречь подмагничиванием стержня за счет внешнего магнитного поля самой стрелки.

При перевертывании стержня во всех трех случаях поведение стрелки изменяться не будет.

12. Нужно взять небольшую железную пластину, например, нож, и помещать ее попеременно то между полюсом магнита и шариком, то над ними. Железная пластина в данном случае представляет собой магнитный экран. Когда он помещен между полюсом магнита и шариком, то магнитные силовые линии замыкаются в нем и шарика не достигают. Когда мы поднимаем железную пластину, то шарик притягивается к магниту и отклоняется от вертикали. Несколько таких манипуляций, и шарик начинает качаться.

13. Такой «вечный» двигатель не будет работать по одной простой причине. Если магнитное поле достаточно сильное, чтобы втащить шарик по наклонной плоскости, то оно будет достаточно большим и для того, чтобы не дать шарик скатиться вниз по желобу. Следовательно, для того, чтобы такой двигатель работал, необходимо в тот момент, когда шарик провалится в отверстие, магнитное поле отключить и затем включить, когда шарик скатится по желобу вниз. Но это уже будет не вечный двигатель, а машина, которая для работы требует затраты энергии.

14. Поднесенный к экрану осциллографа постоянный магнит будет искажать изображение из-за воздействия магнитного поля на движение электронов в электронно-лучевой трубке.

15. Взаимодействие магнитных полей катушки с током и магнита при таком направлении тока в катушке (рис.19) приводит к притяжению катушки к магниту. Катушка надевается на магнит и двигается по нему до тех пор, пока не остановится на центральной нейтральной линии магнита.

16. В катушке при изменении направления тока поменяется направление магнитного поля, и катушка начнет соскакивать с магнита. После того, как катушка полностью соскользнет с магнита, она перевернется, снова наденется на него другой стороной и будет двигаться до остановки посередине магнита в нейтральной зоне.

17. Отрывание магнитов друг от друга связано с резким уменьшением количества силовых линий, проходящих внутри каждого из них. В момент отрыва в катушке возникает ЭДС индукции, связанная с этим уменьшением числа силовых линий. Стрелка гальванометра отклоняется на некоторый угол.

Когда магниты снова соединяются, то число силовых линий увеличивается и возникает ЭДС индукции противоположного направления, стрелка гальванометра отклоняется в другую сторону.

18. Если по проводникам пропускать токи в одном направлении, то при взаимодействии магнитных полей токов они начинают притягиваться. Поэтому проводники повернутся и встанут параллельно так, чтобы направления токов в них были одинаковы.

19. На проволочное кольцо подается ток по проводам, присоединенных к диаметрально противоположным точкам кольца. Таким образом, образуются два полукольца, включенные в цепь параллельно. По полукольцам идут одинаковые токи в одном направлении. Полукольца в центре кольца создают магнитные поля с векто-

ром индукции, перпендикулярным плоскости кольца. Векторы индукции полуколец равны по величине, но противоположны по направлению, и результирующая индукция магнитного поля в центре кольца будет равна нулю. Так как подводящие провода подключены радиально, то они в центре кольца также дают нуль индукции.

20. Внутри проводника объемный электрический заряд равен нулю, так как концентрация положительных и отрицательных зарядов одинакова, поэтому проявляются только магнитные силы (заряды перемещаются). В случае электронных пучков действуют и магнитные и электрические силы, но преобладают силы отталкивания между одноименными зарядами над магнитными силами притяжения.

21. Если на проводящей резиновой трубке выделить два участка трубки вдоль образующих, то по этим участкам будут идти параллельные токи в одном направлении. При взаимодействии параллельных токов одинакового направления они притягиваются друг к другу. Если представить трубку как большое количество параллельных токов, то диаметр трубки в результате притяжения будет уменьшаться, то есть трубка будет сжиматься.

22. Если в одну из двух параллельных ветвей включить конденсатор, то через эту ветвь не будет проходить постоянный ток, но будет проходить высокочастотный ток. Во вторую ветвь необходимо включить катушку индуктивности, которая будет пропускать постоянный ток, но не будет пропускать высокочастотный ток.

23. Для определения вида катушки в ваттметре следует разорвать цепь питания лампочки карманного фонарика и включить в разрыв поочередно обе катушки. Таковая катушка имеет маленькое сопротивление, и при включении в цепь накал лампочки практически не изменится. Сопротивление же катушки напряжения очень велико, и при ее включении лампочка гореть вообще не будет.

24. Конец пружины будет совершать периодические колебательные движения. При замыкании каждый виток пружины, подобно круговому току, будет создавать свое магнитное поле. Витки пружины представляют собой параллельные проводники, по которым течет ток в одном направлении. При прохождении тока витки за счет взаимодействия магнитных полей притягиваются друг к другу, то есть пружина сжимается и ее нижний конец поднимается из ртути, цепь размыкается. После разрыва цепи магнитные поля исчезают, пружина распрямляется, нижний конец опускается в ртуть и замыкается цепь. После замыкания цепи весь процесс повторяется.

25. Для того, чтобы менять накал электрической лампочки с помощью двух катушек, в которые можно вставлять стальные сердечники, необходимо одну катушку включить последовательно, другую параллельно лампочке (рис.50). Тогда, если в катушку L_1 , включенную последовательно, вставить сердечник, ее сопротивление увеличится и, соответственно, увеличится падение напряжения на катушке L_1 , а на лампочке уменьшится и ее свечение станет слабее. Если же вставить сердечник в катушку L_2 , включенную параллельно, то ее сопротивление увеличится, сила тока на ней уменьшится, а на лампочке увеличится. Так как напряжение между точками А и В не изменяется, то при увеличении силы тока лампочка станет светить ярче.

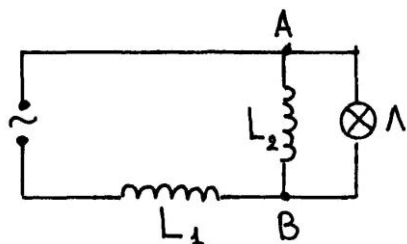
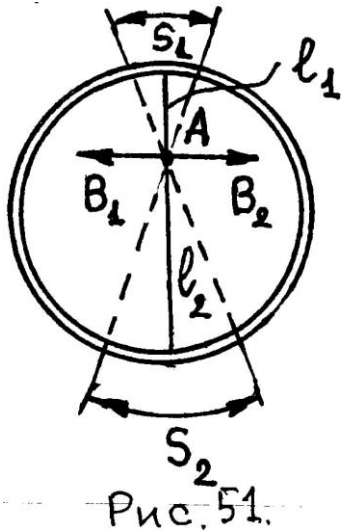


Рис. 50.

26. Ток, протекающий по трубе, можно представить как сумму множества одинаковых линейных токов, равномерно распределенных по поверхности трубы. В

соответствии с этим индукцию магнитного поля в любой точке пространства можно представить как сумму индукций полей, создаваемых такими линейными токами.



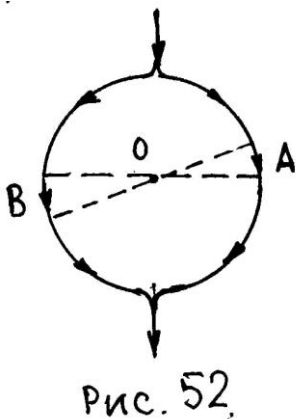
На рис.51 изображено поперечное сечение трубы, вдоль которой проходит ток. Сравним индукции магнитных полей, создаваемых в точке А линейными токами, проходящими через малые дуги S_1 и S_2 . Силы токов I_1 и I_2 , проходящие через S_1 и S_2 , будут пропорциональны S_1, S_2 , то есть $\frac{I_1}{I_2} = \frac{S_1}{S_2}$, но S_1 и S_2 пропорциональны расстояниям от дуг до точки А, следовательно, $\frac{I_1}{I_2} = \frac{l_1}{l_2}$. Индукция магнитного поля, создаваемого каждым из этих элементов в точке А, может быть рассчитана по формуле магнитного поля прямолинейного тока

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi l_1} \text{ и } B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi l_2}.$$

Отсюда $\frac{B_1}{B_2} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi l_1} \cdot \frac{2\pi l_2}{\mu_0 I_2} = \frac{I_1}{I_2} \cdot \frac{l_2}{l_1} = 1$, то есть $B_1=B_2$, или $B_1-B_2=0$ (так как B_1 и B_2 направлены по одной прямой в разные стороны).

Так как для каждого элемента поперечного сечения трубы можно подобрать соответствующий другой элемент, полностью компенсирующий магнитное поле первого элемента в точке А, то результирующее магнитное поле тока, протекающего по трубе в любой точке внутри трубы, будет равно нулю.

27. Внутри коаксиального кабеля индукция магнитного поля определяется только током, который течет вдоль оси внутреннего провода, так как ток, текущий по внешней оболочке, внутри имеет значение индукции, равное нулю (см. «Магнитное поле внутри тонкостенной трубы»). Таким образом, внутри кабеля индукция будет определяться по формуле $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$, где r меньше радиуса внешней оболочки.



28. Все элементы линии тока в разветвлении расположены совершенно симметрично относительно точки О. Каждому элементу А соответствует другой элемент В (рис.52), расположенный параллельно А, имеющий такое же направление тока, удаленный от точки О на такое же расстояние, но находящийся с другой стороны от точки О. Создаваемые элементами А и В индукции магнитного поля в точке О будут равны по величине, но противоположны по направлению и, складываясь, уничтожают друг друга, то есть индукция в точке О равна нулю. Следовательно, на магнитный полюс, помещенный в центре разветвления, сила действовать не будет ($F=0$).

29. На второй катушке намотан провод, сложенный вдвое, то есть имеет так называемую бифилярную обмотку. При такой обмотке в каждом двух соседних витках ток имеет противоположное направление. Действие тока одного направления уничтожается действием тока другого направления, поэтому суммарный магнитный ток в обмотке равен нулю, катушка не будет иметь магнитных свойств. Первая же катушка имеет обычную обмотку.

30. Это может произойти в том случае, если неправильно соединить обмотку одной катушки с другой. Оба полюса получатся либо южные, либо северные. Исправить это можно так: повернуть одну катушку к полюсу сердечника другим концом.

31. Пузырьковый уровень заполнен диамагнитной жидкостью. Когда такую жидкость помещают в магнитное поле, внутри нее создается магнитное поле противоположного направления и она выталкивается из поля. Поэтому пузырек в жидкости приближается к магниту.

32. Электроны вылетают из электронной пушки с небольшим угловым разбросом скоростей и попадают в магнитное поле. При этом в направлении оси электроны имеют одинаковые составляющие скоростей, равные $v_1 = \frac{2eU}{m}$, где e – заряд электрона, m – его масса, и различные составляющие, перпендикулярные к оси и намного меньше, чем v_1 .

Движение вдоль оси – равномерное и прямолинейное. Наличие же перпендикулярных к оси составляющих приводит к искривлению траектории движения электронов. На электрон, влетающий в магнитное поле перпендикулярно к его силовым линиям, действует сила Лоренца

$$F = evB,$$

где v – перпендикулярная к B составляющая скорости электрона. Эта сила сообщает электрону центростремительное ускорение $a = \frac{v^2}{R}$, где R – радиус окружности, по которой будет двигаться электрон. Согласно второму закону Ньютона

$$\frac{mv^2}{R} = evB,$$

откуда

$$R = \frac{mv}{eB}, \quad (1)$$

а период T и частота ω вращения электрона по окружности есть

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{eB}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{eB}{m}. \quad (2)$$

Получен очень важный результат: какими бы не были составляющие скоростей электронов, перпендикулярные к оси трубки, все электроны совершают один оборот за одно и то же время. Если бы составляющие скоростей электронов, параллельные оси трубки, были все равны нулю, то траекториями электронов были бы окружности разных радиусов, проходящие через одну точку – точку вылета электронов из пушки (рис.53), причем в эту точку все электроны приходили бы одновременно.

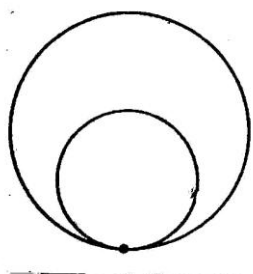


Рис. 53.

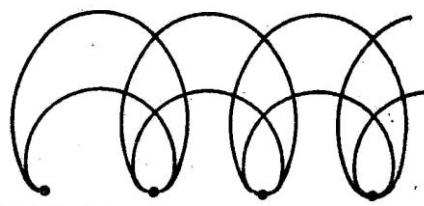


Рис. 54.

Так как электроны участвуют еще в равномерном движении вдоль оси трубки, то результирующими траекториями их движений будут винтовые линии. Эти линии будут пересекаться на каждом шаге винта (рис.54), так как составляющие скоростей, параллельные оси, одинаковы для всех

электронов. В точках пересечения траекторий, очевидно, и фокусируется электронный пучок.

Электронное пятно на экране будет собираться в точку, если расстояние L от электронной пушки до экрана будет кратно шагу винтовой линии $h = v_1 T$, то есть

$$L = n v_1 T = n \frac{2eU}{m} \cdot \frac{2\pi m}{eB} = \frac{n}{B} \cdot 2\pi \frac{2mU}{e}, \quad (3)$$

причем при $V=B_0$ $n=1$, при $V=2B_0$ $n=2$ и т.д.

С помощью такого эксперимента можно определить отношение заряда электрона к его массе (удельный заряд) из последней формулы:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U}{L^2 B_0^2}.$$

Измерив U , L и B_0 , нетрудно найти отношение e/m .

33. Так как при удалении железного сердечника индукция и пропорциональный ей поток магнитного поля в соленоиде будут уменьшаться, то во время удаления возникает ЭДС самоиндукции, стремящаяся сохранить поток и, следовательно, увеличивающая ток соленоида (направления внешней ЭДС, питающий соленоид, и ЭДС самоиндукции одинаковы).

34. ЭДС самоиндукции, определяемая по формуле $\mathcal{E}_S = -L \frac{dI}{dt}$, при одинаковых индуктивностях пропорциональна скорости изменения тока dI/dt , которая тем больше, чем круче прямая. Соответственно, ЭДС самоиндукции больше в индуктивности, изменение тока которой изображается прямой 1 (рис.28). Так как наклон прямых при переходе токов через нуль не изменяется, то сохраняются как численные значения, так и направления ЭДС самоиндукции.

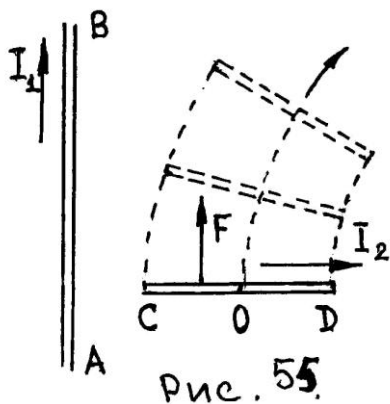
35. При перемагничивании стали в ней выделяется теплота, измеряемая площадью гистерезисной петли. Так как трансформатор работает при переменном токе, то в сердечнике выделяется тем большее количество теплоты, чем больше площадь кривой. Поэтому для сердечника трансформатора более пригодна сталь, гистерезисная кривая которой изображена на рис.29, б. У постоянного магнита желательно иметь как можно большую остаточную индукцию и как можно большую коэрцитивную силу. Более подходящей для изготовления постоянных магнитов является сталь с гистерезисной кривой, представленной на рис.29, а.

36. На проводник с током в магнитном поле действует сила, которую называют силой Ампера. Направление действия этой силы в постоянном магнитном поле зависит от направления тока. Если лампочка накаливания питается переменным током, то поднесенный к ней сильный магнит приведет нить лампочки в колебательное движение и очертания нити станут расплывчатыми. При постоянном токе нить будет видна отчетливо, так как она лишь отклонится в сторону от начального положения.

37. С ростом индукции магнитного поля увеличивается сила Лоренца, которая сообщает электрону центростремительное ускорение $a = \frac{v^2}{R}$, и тогда $F_L = ma$ или $evB = \frac{mv^2}{R}$, откуда $R = \frac{mv}{eB}$ (см. «Электронный пучок фокусируется магнитным полем»). Сила Лоренца с увеличением индукции растет быстрее, чем скорость, и поэтому радиус окружности электрона становится меньше.

38. При движении заряженной частицы в однородном магнитном поле ее энергия не меняется, так как действующая на частицу сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно к направлению перемещения, то есть сила Лоренца не совершает работу.

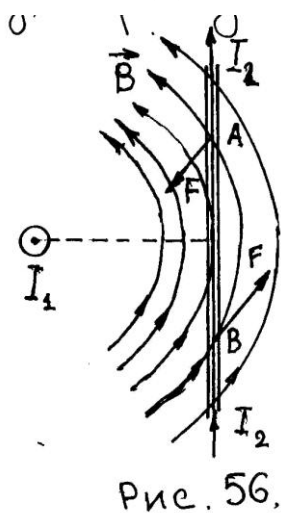
39. Если разбить проводник CD на ряд элементарных участков, то направление движения каждого из элементарных участков определяется по правилу левой руки для силы Ампера. Направление силовых линий индукции магнитного поля, создаваемого проводником AB, перпендикулярно плоскости, в которой лежит проводник CD, и идет за плоскость чертежа (по правилу правого винта). Так как проводник однороден, то центр тяжести его лежит в середине проводника в точке O (рис.55).



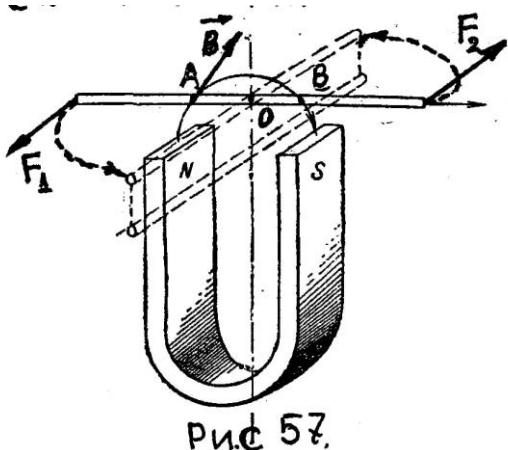
Индукция магнитного поля в точке С будет больше, чем в точке D. На элементы, прилегающие к точке С, со стороны магнитного поля будут действовать большие силы, чем на такие же элементы, прилегающие к точке D. Точка приложения равнодействующей F всех сил, действующих на проводник CD, будет лежать слева от его центра тяжести, поэтому проводник CD, двигаясь вверх, одновременно начнет вращаться по часовой стрелке вокруг точки O.

После того, как проводник CD займет положение, параллельное AB, он начнет удаляться, так как в проводниках токи имеют противоположное направление.

40. Для ответа на вопрос о взаимном положении двух проводников с током с течением времени рассмотрим действие магнитного поля одного проводника на другой. Магнитное поле тока I_1 изображаем в виде силовых линий, направление которых определяется по правилу правого винта (рис.56). На проводник с током I_2 действует пара сил: на участок, прилегающий к точке А, сила направлена перпендикулярно плоскости чертежа (к нам); на участок, прилегающий к точке В, сила направлена перпендикулярно плоскости чертежа за плоскость (от нас). Действие этой пары сил начнет поворачивать проводник с током I_2 до тех пор, пока проводники не станут параллельно друг другу, притом токи будут направлены в одну сторону. После этого провода начнут притягиваться друг к другу.



41. Силовые линии магнитного поля выходят из северного полюса, то есть в точке А проводника они проходят снизу вверх. По правилу левой руки на левый конец проводника действует сила F_1 (рис.57). В точке O силовые линии магнитного поля идут параллельно направлению тока, и на эту часть проводника сила не действует. Силовые линии в точке В входят в южный полюс, то есть идут сверху вниз. Тогда по тому же правилу левой руки на правый конец провод-



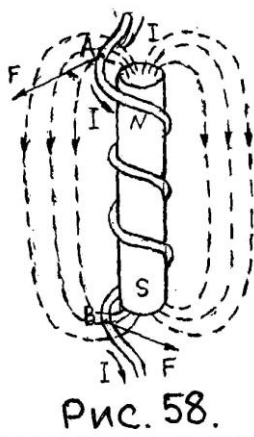
41. Силовые линии магнитного поля выходят из северного полюса, то есть в точке А проводника они проходят снизу вверх. По правилу левой руки на левый конец проводника действует сила F_1 (рис.57). В точке O силовые линии магнитного поля идут параллельно направлению тока, и на эту часть проводника сила не действует. Силовые линии в точке В входят в южный полюс, то есть идут сверху вниз. Тогда по тому же правилу левой руки на правый конец провод-

ника будет действовать сила F_2 . Силы F_1 и F_2 начнут вращать проводник в горизонтальной плоскости вокруг точки O против часовой стрелки (если смотреть сверху) до тех пор, пока проводник не станет параллельно ножкам магнита (изображен штриховыми линиями). После того, как проводник повернется в это положение, на него начнет действовать сила (по правилу левой руки), которая теперь будет направлена вниз. Проводник будет опускаться вниз.

42. Силовые линии магнитного поля прямолинейного тока I_1 (рис.33) представляют собой концентрические окружности. В том случае, когда направление силовых линий магнитного поля совпадает с направлением тока в проводнике, поле на проводник не действует. Круговой ток I_2 проходит вдоль одной из силовых линий тока I_1 , следовательно, на круговой ток магнитное поле тока I_1 не действует.

На прямолинейный ток I_1 также не будет действовать никаких сил со стороны магнитного поля кругового тока. Таким образом, сила взаимодействия кругового тока и прямолинейного тока, проходящего по оси кругового тока, равна нулю.

43. После пропускания тока по свободно висящему проводнику на отдельные его участки начинает действовать сила Ампера со стороны магнитного поля постоянного магнита. Для установления характера движения проводника следует определить направление силовых линий на участках, прилегающих к точкам A и B (рис.58), и затем определить направление действия силы Ампера F (по правилу левой руки). Действие этой силы на участках вблизи точек A и B приводит к тому, что провод обвивает магнит, как показано на рис.58.



44. Силы взаимодействия между двумя проводниками с током обусловлены взаимодействием магнитных полей. Если силовые линии магнитных полей между проводниками направлены навстречу друг другу, то поле ослабляется и проводники притягиваются.

Если силовые линии магнитных полей между проводниками направлены в одну сторону, то поле усиливается и проводники стремятся удалиться друг от друга. Но если катушки с установившимися в них токами надеты на железный сердечник, магнитная проницаемость которого очень большая, и поэтому все силовые линии магнитного поля проходят по сердечнику, то перемещение какой-либо из катушек вдоль сердечника никак не изменит расположение силовых линий магнитного поля внутри сердечника. Поскольку взаимодействие между проводниками с током всегда связано с изменением магнитного поля, а в случае железного сердечника характер магнитного поля задан формой сердечника и не изменяется при изменении взаимного расположения катушек, силы взаимодействия между катушками меняться не будут.

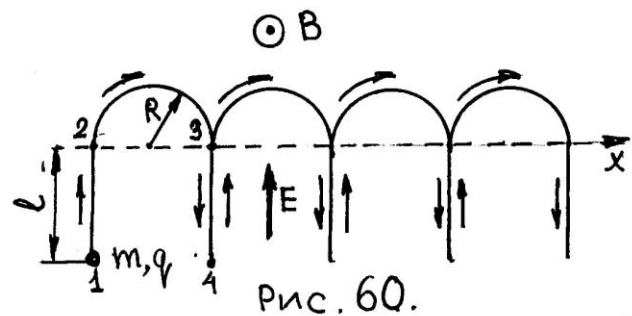
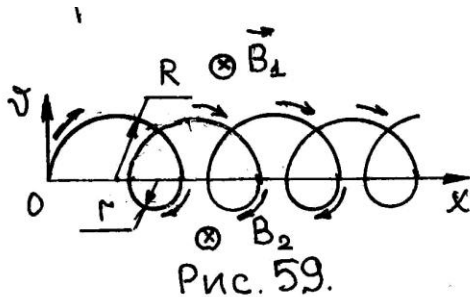
45. Сила Лоренца определяется индукцией магнитного поля B , величиной заряда q и скоростью его движения v и равна $F_L = Bqv \sin \alpha$, где α – угол между направлениями вектора B и вектора скорости v . Сила Лоренца направлена перпендикулярно к векторам скорости и индукции. Если заряженная частица, в нашем случае электрон, движется перпендикулярно силовым линиям магнитного поля ($\alpha=90^\circ$), то сила Лоренца в однородном магнитном поле действует на электрон как центростремительная сила $Bqv = \frac{mv^2}{R}$ и заставляет его двигаться по окружности радиуса

$R = \frac{mv}{Bq}$. В области с меньшим значением индукции электрон движется по окружности большего радиуса R , в области в большем значении индукции – по окружности меньшего радиуса r (рис.59).

Дрейфовая скорость – это скорость перемещения электрона вдоль границы раздела магнитных полей. В области с индукцией B_1 радиус $R = \frac{mv}{B_1q}$, в области с индукцией B_2 радиус $r = \frac{mv}{B_2q}$. Время одного полуоборота в первом поле равно $t_1 = \frac{\pi R}{v} = \frac{\pi m}{qB_1}$, во втором поле – $t_2 = \frac{\pi m}{qB_2}$. Общее время полного оборота $t = \frac{\pi m}{q} \left(\frac{1}{B_1} + \frac{1}{B_2} \right)$. За это время смещение будет равно $x = 2R - 2r = 2 \frac{mv}{q} \left(\frac{1}{B_1} - \frac{1}{B_2} \right)$. Дрейфовая скорость

$$v_{др} = \frac{x}{t} = \frac{\frac{2mv}{q} \frac{B_2 - B_1}{B_1 B_2}}{\frac{\pi m}{q} \frac{B_2 + B_1}{B_1 B_2}} = \frac{2v}{\pi} \frac{B_2 - B_1}{B_2 + B_1}.$$

46. Положительно заряженная частица находится в электрическом поле на расстоянии l от границы раздела электрического и магнитного полей. Так как вектор напряженности электрического поля E перпендикулярен к границе раздела (рис.60), то заряд двигается по прямой по направлению вектора E из точки 1 в точку 2. Двигаясь с ускорением, заряд в точке 2 будет иметь скорость $v = \frac{2qEl}{m}$, с которой он попадает в однородное магнитное поле. Влетая перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, заряд двигается по полуокружности радиусом $R = \frac{mv}{Bq}$ (см. ответ к задаче 45) и попадает в точку 3, имея скорость v (в магнитном поле она не меняется), перпендикулярную к границе раздела. В электрическом поле, двигаясь равноускоренно с таким же значением ускорения, как при движении из точки 1 в точку 2, только с противоположным знаком, заряд проходит расстояние l и останавливается в точке 4.



Затем весь процесс движения заряда повторяется; в результате получается траектория движения заряда, представленная на рис.60.

Скорость дрейфа частицы вдоль проникаемой для нее границы раздела магнитного и электрического полей определяется следующим образом. Расстояние $2R$ частица проходит за время, которое затрачивается частицей на движение по полуокружности и плюс время на движение частицы в электрическом поле на расстояние l туда и обратно от границы раздела.

Расстояние смещения $2R = 2 \frac{mv}{Bq} = 2 \frac{m \frac{2qEl}{m}}{Bq} = \frac{2}{B} \frac{2mEl}{q}$. Время движения по полуокружности $t_1 = \frac{T}{2}$, $T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi mv}{Bq} = \frac{2\pi m}{Bq}$, $t_1 = \frac{\pi m}{Bq}$. Время прохождения расстояния l находим из $l = \frac{at^2}{2}$, где $a = \frac{Eq}{m}$. Тогда $t_2 = 2 \frac{2l}{a} = 2 \frac{2ml}{Eq}$. Общее время $t = \frac{\pi m}{Bq} + 2 \frac{2ml}{Eq}$. Скорость дрейфа $v_{др} = \frac{2R}{t_1+t_2} = \frac{\frac{2}{B} \frac{2mEl}{q}}{\frac{\pi m}{Bq} + 2 \frac{2ml}{Eq}} = \frac{2 \frac{2El}{\pi \frac{m}{q} + 2 \frac{2l}{EB}}}$.

47. При замыкании цепи от источника постоянного тока между краем диска, который погружен в чашечку с ртутью, и осью, которая имеет контакт с диском, возникает разность потенциалов. В результате чего от края диска к оси в радиальном направлении начинает протекать постоянный ток. Так как диск находится между полюсами подковообразного магнита, то на радиальный ток действует сила Ампера, которая приводит диск во вращательное движение. Определяя направление силы Ампера по правилу левой руки, видим, что диск начинает вращаться по часовой стрелке, если смотреть на диск со стороны северного полюса (рис.36).

48. При замыкании цепи в растворе потечет ток от центрального электрода к медному кольцу. На положительные и отрицательные ионы, движущиеся навстречу друг другу, со стороны магнитного поля будут действовать силы Лоренца, направленные в одну сторону. Жидкость начнет вращаться по часовой стрелке.

49. При введении сердечника в катушку происходит изменение магнитного потока и, соответственно, в катушке возникает ЭДС индукции. Согласно правилу Ленца, возникающая ЭДС индукции имеет такое направление, чтобы препятствовать изменению причины, вызывающей индукционный ток. Поэтому ток в цепи будет падать и, следовательно, накал нити электрической лампочки будет уменьшаться.

50. В двух половинках согнутого пополам проводника возникают равные по величине, но противоположные по знаку ЭДС индукции, которые взаимно компенсируют друг друга, и индукционный ток в таком контуре равен нулю, гальванометр показывает нуль.

51. Когда магнит будет вдвигаться в медное кольцо, подвешенное в вертикальной плоскости, в нем будет возникать индукционный ток. По закону Ленца индукционный ток в кольце приведет к возникновению магнитного поля, которое, взаимодействуя с полем магнита, будет препятствовать его движению, а следовательно, магнит, в свою очередь, будет с такой же силой действовать на кольцо. Поэтому движение магнита будет отклонять кольцо от первоначального вертикального положения.

Если железный стержень не обладает никаким остаточным магнетизмом, то движение этого стержня сквозь медное кольцо никакого влияния на положение кольца оказывать не будет.

52. При падении магнита вдоль оси медного кольца (и вообще через любое металлическое кольцо) в нем возникает ЭДС индукции и по кольцу потечет индукционный ток. Взаимодействие магнитных полей этого тока и падающего магнита по закону Ленца таково, что препятствует движению магнита, вызывающему ЭДС ин-

дукции. Поэтому падение магнита сквозь металлическое кольцо будет происходить с ускорением, меньшим, чем ускорение свободного падения.

53. В сплошном медном кольце при падении на вертикальный магнит будет возникать ЭДС индукции (см. «Падение магнита в медное кольцо»). При этом возникающее в кольце магнитное поле будет противодействовать его падению с ускорением свободного падения (закон Ленца). В разрезанном медном кольце индукционный ток возникать не будет, так как контур не замкнут, и оно будет падать с ускорением свободного падения. Следовательно, разрезанное кольцо упадет быстрее, чем сплошное.

54. При включении обмотки катушки в сеть переменного тока в ней изменяющийся ток создает изменяющееся магнитное поле. Это поле возбуждает в кольце индукционный переменный ток, магнитное поле которого направлено противоположно магнитному полю катушки (правило Ленца). Магнитные поля противоположно направленных токов, взаимодействуя, стремятся оттолкнуть друг от друга проводники, по которым текут эти токи. Вследствие того, что проводники с токами, направленными в противоположные стороны, отталкиваются, кольцо в момент включения подсакивает и затем парит над катушкой на некоторой высоте. Высота, на которой будет парить кольцо, зависит от веса кольца: чем оно легче, тем выше поднимается.

При медленном увеличении тока в катушке кольцо начнет медленно подниматься вверх. Если увеличить диаметр кольца, то увеличится электрическое сопротивление, соответственно, уменьшится сила тока и кольцо опустится ниже предыдущего уровня.

При включении катушки в цепь постоянного тока кольцо будет подсакивать в момент включения и выключения вследствие возникновения в кольце индукционного тока противоположного направления, все остальное время кольцо будет лежать на катушке.

55. В большом медном листе катушка, по которой течет переменный ток, будет создавать индукционные токи Фуко, магнитное поле которых будет значительно, если не полностью, ослаблять поле катушки В. Вольтметр, на который замкнута катушка А, либо ничего не покажет, либо покажет небольшое напряжение.

56. Силовые линии магнитного поля, создаваемого проводником с током, перпендикулярны плоскости, проходящей через проводник и ось вращения. В тот момент, когда рамка находится в плоскости, проходящей через проводник и ось, при вращении стороны рамки практически скользят вдоль силовых линий и магнитный поток почти не изменяется; ЭДС индукции в этот момент будет равна нулю. Если рамка расположена перпендикулярно к плоскости, проходящей через проводник и ось, то в этот момент рамка пересекает магнитные силовые линии и скорость изменения магнитного потока будет максимальной, соответственно, ЭДС индукции в рамке в этот момент будет иметь максимальное значение.

57. Переменное магнитное поле возбуждает токи, как в неподвижной медной пластине, так и в диске. В отсутствии пластинки ток существовал бы только в диске и был направлен так, что его магнитное поле вызвало бы отталкивание всего диска от магнита. Однако, когда диск частично экранирован от магнита пластинкой, токи, индуцированные в диске и пластинке, вызывают их взаимное притяжение (магнит-

ное поле одного проводника втягивает другой проводник с током), и диск приходит во вращение.

58. В круговом проводнике В пропускается электрический ток, и вокруг проводника создается магнитное поле, которое пронизывает круговой проводник А. Если величина тока в проводнике В не меняется во времени, то не меняется и магнитное поле, пронизывающее проводник А. Поэтому в проводнике А индукционный ток не возникает. При увеличении величины тока в проводнике В при неизменном его значении индукционный ток также возникать не будет. Индукционный ток в проводнике А будет возникать только в момент перехода от одной силы тока к другой.

59. Частота колебаний контура обратно пропорциональна корню из емкости конденсатора и индуктивности катушки. Индуктивность катушки зависит от магнитной проницаемости материала сердечника. В медном сердечнике возникают индукционные токи Фуко, магнитное поле которых ослабляет магнитное поле катушки. Это приводит к уменьшению индуктивности и, следовательно, к увеличению частоты колебаний. Сердечник из порошка феррита увеличивает магнитное поле катушки; у него практически не возникают токи Фуко. Соответственно, возрастает индуктивность катушки, а частота – уменьшается.

60. Показания гальванометра определяются величиной электродвижущей силы индукции, возникающей в замкнутом контуре, образованном отрезками АС и ВD и замыкающими эти отрезки с одной стороны цепью гальванометра (АВ), а с другой – стержнем 3 (СD) (рис.43); ЭДС индукции возникает вследствие того, что рассмотренный контур пронизывается вертикальной составляющей магнитного поля Земли, а при перемещении стержня 3 площадь контура изменяется, в результате чего изменяется магнитный поток, пронизывающий контур. При равномерном движении стержня 3 скорость изменения площади контура, то есть скорость изменения магнитного потока постоянна, а значит, постоянна и величина ЭДС индукции. Но в случае, когда стержень 3 приближается к гальванометру, площадь контура и величина потока уменьшается, а когда стержень удаляется от гальванометра, то площадь контура и величина потока возрастают. Вследствие этого в двух рассмотренных случаях гальванометр будет давать одинаковые по величине, но противоположные по направлению отклонения.

61. Если в замкнутую катушку вдвигать магнит, то при изменении магнитного потока от нуля, когда магнит находится за пределами катушки, до какого-то максимального значения, когда магнит вставлен в катушку, возникает индукционный ток. Индукционным током переносится заряд, величина которого определяется изменением магнитного потока, а так как это изменение будет одинаковым при любой скорости перемещения магнита, то переносимый по катушке заряд также будет одинаковым. Что касается количества теплоты, которая выделяется в катушке, то оно пропорционально силе тока в квадрате, а сила тока пропорциональна скорости движения магнита. Таким образом, чем больше скорость движения магнита, тем большее количество теплоты выделяется в катушке.

62. При полете самолета вдоль магнитного меридиана он пересекает вертикальную составляющую силовых линий магнитного поля Земли, поэтому на концах крыльев самолета возникает разность потенциалов, то есть потенциалы концов крыльев будут различны. При полете по любому другому направлению разность потен-

циалов сохранит такое же значение, так как она зависит только от величины вертикальной составляющей магнитного поля Земли и величины горизонтальной скорости самолета.

Если два одинаковых самолета летят с одинаковой горизонтальной скоростью, один вблизи экватора, другой – у полюса, то большая разница потенциалов на концах крыльев будет у самолета, летящего вблизи полюса, так как здесь будет намного больше вертикальная составляющая магнитного поля Земли, чем на экваторе.

63. Мощность, потребляемая первичной обмоткой трансформатора из сети, равна $P_1=I_1U_1$, где I_1 – сила тока, U_1 – напряжение на первичной обмотке. Мощность, потребляемая нагрузкой, равна $P_2=I_2U_2$, где I_2 – сила тока, U_2 – напряжение на вторичной обмотке. В трансформаторе отсутствуют вращающиеся части и, следовательно, нет потерь на трение. Что касается других потерь, то они относительно малы. Поэтому мощности на первичной и вторичной обмотках примерно равны, и тогда $I_1U_1 \approx I_2U_2$. Отсюда следует, что $\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$, где N_1 – число витков на первичной обмотке, N_2 – число витков на вторичной обмотке. Таким образом, силы тока в обмотках трансформатора приближенно обратно пропорциональны числу витков в обмотках (напряжения прямо пропорциональны).

Если трансформатор подключить к источнику постоянного тока, то на вторичной обмотке напряжение появится только в момент включения, когда будет меняться магнитный поток. Когда же на первичной обмотке будет постоянный ток, трансформатор работать не будет и на вторичной обмотке напряжение будет равно нулю.

Сердечник трансформатора собирается из листов электротехнической стали, изолированных друг от друга для того, чтобы уменьшить потери на вихревые токи. Вихревые токи (или токи Фуко) возникают в проводниках при изменении пронизывающего их магнитного потока. Вихревые токи – замкнутые электрические токи, возникая в проводниках, нагревают их. В массивных проводниках, где электрическое сопротивление будет очень малым, токи будут большие и большими будут потери на нагревание, особенно при использовании токов высокой частоты (ТВЧ). Для увеличения сопротивления и уменьшения силы тока проводники берут в виде тонких пластин. Обладая большим сопротивлением, пластины в переменном магнитном поле нагреваются очень слабо.

64. В трансформаторе происходит преобразование переменного напряжения и силы тока. Концы первичной обмотки подключены к сети питающего переменного тока, а концы вторичной обмотки – к потребителям электрической энергии. ЭДС электромагнитной индукции, возникающая во вторичной обмотке, пропорциональна числу витков в ней; поэтому напряжение на выходе трансформатора не меняется, если не меняется число витков первичной и вторичной обмоток. Следовательно, при изменении силы тока на первичной обмотке напряжение на вторичной обмотке будет оставаться неизменным.

65. Если подключить одну из обмоток трансформатора к источнику переменного тока и измерить вольтметром напряжение на концах обеих обмоток U_1 и U_2 , то можно определить отношение числа витков в двух обмотках, так как $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$, где N_1 и N_2 – число витков в первой и второй обмотках. Однако это измерение не даст возможности определить N_1 и N_2 по отдельности. Но если намотать на сердечник дополнительную обмотку, имеющую известное число витков N_3 , то можно записать

соотношение $\frac{U_1}{U_3} = \frac{N_1}{N_3}$, из которого определяется N_1 , а затем из первого соотношения и N_2 . При наличии достаточно чувствительного вольтметра можно взять $N_3=1$, то есть просто пропустить кусок провода через ярмо сердечника и замкнуть концы провода на зажимах вольтметра.

66. Если во вторичной обмотке хотя бы один виток замыкается накоротко, то через короткозамкнутый виток потечет большой ток, так как образующаяся в нем ЭДС индукции замыкается на его собственное сопротивление (которое очень мало). В исправном работающем трансформаторе ЭДС индукции, образующаяся в обмотке, замыкается на большое внешнее сопротивление. Короткозамкнутый виток вторичной обмотки из-за большой силы тока в нем может привести к выходу из строя также первичную обмотку.

67. Основная причина шума трансформаторов заключается в вибрации сердечника, которая возникает вследствие магнитострикции, зависящей как от индукции магнитного поля, так и от физических и структурных параметров электротехнической стали. Магнитострикция – это явление деформации (изменение формы и размеров) ферромагнитного материала, помещенного в переменное магнитное поле. В процессе возрастания индукции сначала происходит смещение границ кристаллов (доменов) материала, а затем их вращение, что ведет к изменению линейных размеров стали.

При перемагничивании материала сердечника индукция в нем достигает максимума дважды за один период колебаний переменного тока, что соответствует двукратному изменению длины листов стали магнитной системы. Это ведет к периодическим колебаниям магнитной системы на удвоенной частоте переменного тока и возникновению шума в виде звука с частотой 100 Гц.

Кроме магнитострикции, источником шума трансформаторов является обмотка, проводники которой вибрируют под действием сил взаимного притяжения при протекании в них переменного тока в режиме нагрузки. Генерирующими звук поверхностями здесь являются торцевые части обмотки, прессующие кольца. Частотный спектр звука обмотки при синусоидальном токе содержит почти исключительно кратную промышленной частоте гармонику, то есть 100 Гц для сети 50 Гц. Таким образом, вибрации и сердечника, и обмотки приводят к возникновению звуковых колебаний с частотой 100 Гц.

68. При разомкнутой вторичной обмотке трансформатора значение сдвига фаз φ_1 между силой тока I_1 в первичной обмотке и подводимым к ней напряжением U_1 близко к $\pi/2$ (90°), так как в цепи очень маленькое активное сопротивление и очень большое индуктивное сопротивление (две катушки с сердечником). Поэтому мощность, потребляемая первичной обмоткой трансформатора от сети и определяемая по формуле $P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi$ при отключенной вторичной обмотке равна нулю, то есть энергия от сети не потребляется. Потребление энергии происходит только тогда, когда на вторичной обмотке трансформатора появляется нагрузка.

Таким образом, понижающий трансформатор, питающий электрический звонок, в любой момент мог сработать, его первичная обмотка остается постоянно подключенной к сети и при этом не потребляет энергию. Кнопка звонка ставится в цепь вторичной обмотки, которая начинает работать только при замыкании цепи кнопкой.

69. Если трансформатор, рассчитанный на работу при переменном напряжении 127 В, включить в цепь с постоянным напряжением 110 В, то первичная обмотка трансформатора сгорит, так как у нее большое индуктивное сопротивление, а активное (омическое) очень маленькое.

70. При изменении пронизывающего проводники магнитного потока в проводниках возникают индуцируемые замкнутые электрические токи (токи Фуко или вихревые токи). Возникая в проводниках, особенно если они массивные, вихревые токи их нагревают. Таким образом, возникающие вихревые токи в массивных проводниках приводят к потерям энергии – «потери на вихревые токи». Для уменьшения вихревых токов магнитопроводы изготавливают из отдельных электрически изолированных пластин. Поэтому для уменьшения потерь статоры и роторы электродвигателей делают из изолированных пластин.

Если в работающем электродвигателе остановить ротор, то по цепи статора потечет максимальный ток, так как будет отсутствовать ЭДС индукции в роторе, и обмотка статора может сгореть.

71. При включении внешнего напряжения мотор с быстро вращающимся якорем превращается в генератор постоянного тока. Генератор с короткозамкнутыми клеммами создает сильный ток, который по правилу Ленца направлен так, что, взаимодействуя с магнитным полем машины, он тормозит вращение якоря и останавливает вагон трамвая. Однако этот метод торможения трамвая, троллейбуса или электровоза применять при очень большой скорости нельзя, так как ток короткого замыкания при быстром вращении якоря может оказаться настолько сильным, что обмотки мотора сгорят. Поэтому практически клеммы мотора замыкают не накоротко, а через переменное сопротивление, величина которого подбирается так, чтобы при этом не возникала опасность перегорания обмоток мотора.

72. Переменное магнитное поле, создаваемое вращающимся магнитом, возбуждает в алюминиевом диске индукционные вихревые токи, которые, в свою очередь, создают собственное магнитное поле. При взаимодействии этих магнитных полей возникает вращающий момент сил, действующих на диск, который заставляет диск вращаться в том же направлении, что и магнит.

Борисовский Василий Васильевич

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ
(теория и практика)

Учебное пособие для студентов технических направлений
всех форм обучения

Редактор Е.Ф. Изотова

Подписано к печати 25.02.15. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 3,2. Тираж 50 экз. Зак. 151379. Рег. № 10.

Отпечатано в ИТО Рубцовского индустриального института
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6.