

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет доуниверситетской подготовки и профессиональной ориентации

А. А. Григорьев

Э Л Е К Т Р О М А Г Н Е Т И З М

Методическое пособие
для иностранных слушателей
подготовительного отделения

Минск БГУИР 2009

УДК 537.8(076)
ББК 22.33я73
Г83

Рецензент:
доцент кафедры физики Учреждения образования БГУИР,
канд. физ.-мат. наук А. В. Березин

Григорьев, А. А.

Г83 Электромагнетизм : метод. пособие для иностр. слушателей подготов. отд. / А. А. Григорьев. – Минск : БГУИР, 2009. – 52 с. : ил.
ISBN 978-985-488-449-3

В пособии предлагаются адаптированные тексты для чтения по следующим разделам физики: электростатика, законы постоянного тока, магнетизм, переменный ток. В конце каждого параграфа даны вопросы для самоконтроля, задачи, также приведены решения задач.

Предназначено иностранным слушателям подготовительного отделения для ознакомления с физической лексикой и развития фонетических навыков говорения на русском языке.

УДК 537.8(076)
ББК 22.33я73

ISBN 978-985-488-449-3

© Григорьев А. А., 2009
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2009

ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

§ 1.1. Источники тока

Направленное движение заряженных частиц называется *электрическим током*. Познакомимся с устройствами, предназначенными для создания в проводниках длительного электрического тока.

Известно множество различных источников тока. Простейшие из них – *гальванические элементы*. Они превращают свою внутреннюю энергию в электроэнергию. Аналогичное превращение энергии происходит и в аккумуляторах. Однако после того как энергия аккумулятора иссякнет, его можно вновь зарядить, и он опять будет служить источником тока. Образно выражаясь, обычные гальванические элементы – это «одноразовые», а аккумуляторы – «многоразовые» источники тока.

Кроме отдельных аккумуляторов и гальванических элементов часто встречаются их *батареи* – несколько элементов, соединенных вместе. На рис. 1.1 цифрой 2 обозначена батарея гальванических элементов, а цифрой 4 – батарея аккумуляторов.



Рис. 1.1

В повседневной жизни в качестве источников тока часто применяют *выпрямители*. Цифрой 5 на рис. 1.1 обозначен выпрямитель (блок питания), служащий источником тока для некоторых электронных приборов – сотовых телефонов, цифровых фотоаппаратов. Блок питания используют и для зарядки аккумуляторов разного типа, например 1 и 3 (см. рис. 1.1).

Известны так же такие источники тока, как *термоэлементы* и *пьезоэлементы*. Первые из них работают за счет подводимой к ним тепловой энергии, а вторые – за счет потенциальной энергии, возникающей при их деформации.

На космических кораблях, а также в странах с большим числом солнечных дней для получения электроэнергии используют *фотоэлементы*, которые

называют «солнечными» батареями. Они превращают энергию солнечного излучения в электрическую энергию.

На электростанциях используют *индукционные генераторы*. Они работают за счет кинетической энергии движущейся воды или пара.

Любой источник тока обязательно имеет не менее двух полюсов – металлических проводников, предназначенных для присоединения потребителей электроэнергии. Например, аккумулятор или «батарейка» имеют два полюса: положительный и отрицательный. На рис. 1.2 они обозначены знаками «+» и «-». На положительном полюсе – недостаток электронов, на отрицательном – их избыток. Цель работы любого источника тока состоит в долговременном поддержании неодинаковой электризации его полюсов.

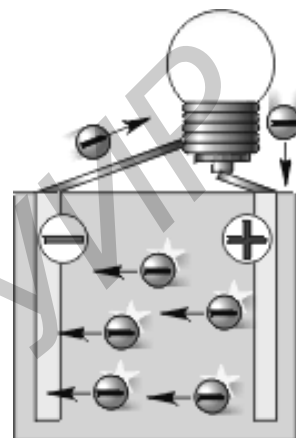


Рис. 1.2

Рассмотрим это на конкретном примере. Присоединим к «батарейке» лампочку от карманного фонарика. Избыточные электроны, имеющиеся на отрицательном полюсе, в момент соединения контактов будут двигаться через лампочку к положительному полюсу «батарейке». Это приведет к частичной нейтрализации его заряда. Поэтому если внутри «батарейки» электроны не будут вновь попадать на отрицательный полюс, то ток через лампочку быстро прекратится.

Обратите внимание: снаружи источника тока электроны движутся от «-» к «+», как и должны двигаться отрицательные частицы, находящиеся в электрическом поле. Однако внутри источника тока электроны движутся от «+» к «-». Такое движение возможно лишь благодаря затратам какой-либо энергии. В «батарейке» и аккумуляторах такой энергией является их *внутренняя энергия*, высвобождающаяся за счет *химических* реакций.

Контрольные вопросы

1. Что такое источник тока?
2. Назовите виды источников тока.
3. Как движутся электрические заряды внутри батареи?

§ 1.2. Действия тока

Как узнать, есть ли в проводнике ток или нет? Если разрезать провод, то увидеть там электрический ток невозможно, потому что электроны не видны даже в оптический микроскоп. Однако можно узнать, есть в проводнике ток или нет, если наблюдать явления, которые возникают вокруг проводника. Оказывается, прохождение тока по проводнику всегда сопровождается хотя бы одним из особых явлений: магнитным, химическим или тепловым действием тока.



Рис. 1.3

На рис. 1.3 показано *магнитное* действие тока. К источнику тока подключена катушка, на которую навит провод. Внутри катушки вставлен металлический стержень. При включении тока стержень становится магнитом и начинает притягивать другие железные и металлические предметы (на рис. 1.3 – мелкие гвозди).

Магнитное действие тока наблюдается вокруг любых проводников: прямых или свитых в спираль, твердых, жидких или газообразных.

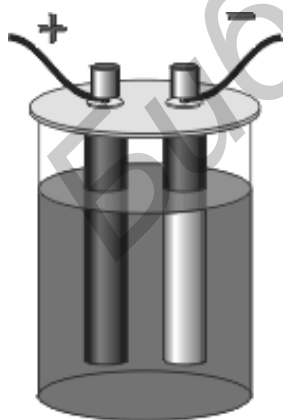


Рис. 1.4

На рис. 1.4 изображен пример *химического* действия тока. В стакан с раствором соли меди (CuSO_4) опущены два угольных стержня, которые подключены к источнику тока. Через несколько минут на одном из стержней образуется тонкий слой вещества ярко-красного цвета. Это – чистая медь, осевшая из раствора на электрод. Произошло явление,

при котором одно вещество (соль меди) превратилось в другое (металлическая медь). На угольных стержнях произошла химическая реакция из-за прохождения электрического тока через электролит.

Химическое действие тока всегда наблюдается в жидких проводниках, реже – в газообразных. В твердых проводниках химические реакции протекать не могут, так как в них отсутствуют подвижные ионы.

Тепловое действие тока наблюдают часто в бытовых приборах: в утюгах, электронагревателях и лампах. Обычно говорят, что спираль нагревателя нагрета до «красного каления», а спираль электрической лампочки – до «белого каления». Почему же при прохождении тока проводник нагревается? Другими словами, в чем состоит объяснение теплового действия тока?

Вспомним, что ток в металлическом проводнике – это упорядоченное движение электронов. Проводник имеет кристаллическую структуру, поэтому электронам приходится двигаться между ионами, сталкиваясь с ними. При этом часть кинетической энергии электронов передается ионам кристаллической решетки, что заставляет их колебаться с большей амплитудой. А это приводит в итоге к нагреванию проводника.

Тепловое действие тока в *жидких* и *газообразных проводниках* также объясняется взаимодействием движущихся заряженных частиц (ионов и электронов) с покоящимися атомами и молекулами.

При любом действии тока происходит превращение электроэнергии в другие виды энергии. Быстроту выделения энергии в этом процессе принято характеризовать специальной величиной – *мощностью* тока.

Продедаем опыт. Возьмем три лампы (рис. 1.5) различной мощности – 40, 60 и 100 Вт – и включим их одновременно. Увидим, что более мощная, то есть 100-ваттная лампочка, дает явно Больше тепла и света, чем лампа на 40 или 60 Вт.



Рис. 1.5

Таким образом, мощность тока – физическая величина, характеризующая скорость выделения энергии при переходе электрических процессов в другие виды. Единица измерения мощности $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$. Это значит, что при мощности в 1 Вт энергия выделяется со скоростью 1 джоуль в секунду. То есть лампа мощностью 60 Вт теряет каждую секунду 60 Дж электроэнергии и превращает их в тепло и свет.

Контрольные вопросы

1. Какие явления появляются при протекании тока?
2. Какой величиной характеризуется скорость процесса выделения энергии?

§ 1.3. Электрическая цепь

Кроме источников тока существуют также и *потребители* электроэнергии – лампы, пылесосы, звонки, компьютеры и др. Для их включения и отключения применяют *выключатели, кнопки и рубильники*. Источник тока и потребители электроэнергии,

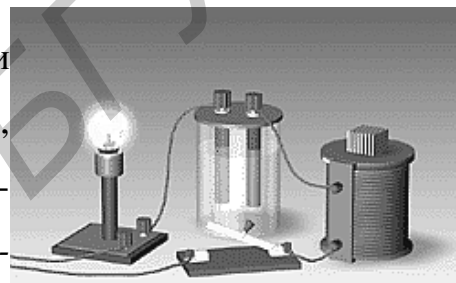


Рис. 1.6

соединенные проводниками, в физике называют *электрической цепью*. На рис. 1.6 изображена простая электрическая цепь для одновременного наблюдения теплового, химического и магнитного действий тока.

В физике все электроприборы имеют условные обозначения (рис. 1.7):



Рис. 1.7

На практике приходится использовать много электроприборов, соединенных в разнообразные электрические цепи, которые могут быть достаточно сложными. И чтобы лучше их понимать, воспользуемся электрическими схемами. Ниже (рис. 1.8) показана схема цепи, изображенной на рис. 1.6.

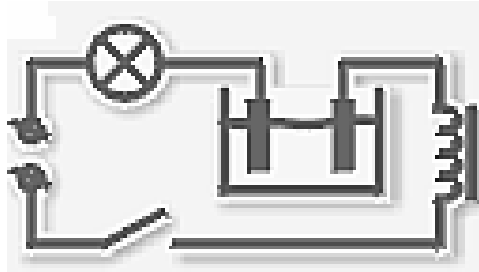


Рис. 1.8

Виды соединений проводников

Схемы, которые состоят из источника тока и двух лампочек, изображены на рис. 1.9. Верхнее соединение проводников называют *последовательным*, потому что электроны, двигаясь от клеммы «←» источника тока, пройдут через обе лампочки последовательно, то есть сначала через левую лампочку, а затем – через правую. Нижнее соединение проводников называется *параллельным*. Это название подчеркивает то, что, двигаясь от источника тока, все электроны разделятся на две «группы», которые пройдут через лампочки параллельно, независимо друг от друга.

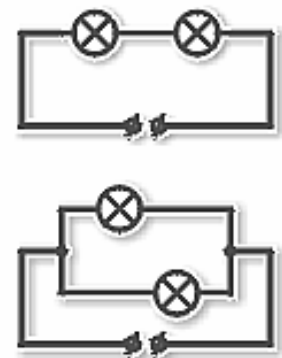


Рис. 1.9

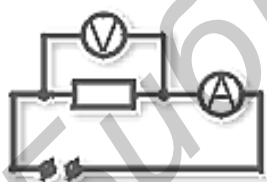


Рис. 1.10

В электрических цепях часто встречается *смешанное* соединение электроприборов. Например, на схеме рис. 1.10 показано параллельное соединение резистора и вольтметра. Эта группа приборов последовательно соединена с амперметром и клеммами для подключения источника тока.

Контрольные вопросы

1. Что такое электрическая цепь?
2. Какие виды соединений проводников вы знаете?

§ 1.4. Начальные сведения о силе тока и сопротивлении

Соберем цепь из лампочки и источника тока (рис. 1.11). При замыкании цепи лампочка загорится. Включим теперь в цепь отрезок стальной проволоки. Лампочка станет гореть слабее. Добавим последовательным образом еще одну стальную проволоку. Накал спирали лампочки еще уменьшится. Таким образом, наблюдается ослабление теплового действия тока или уменьшение мощности тока.

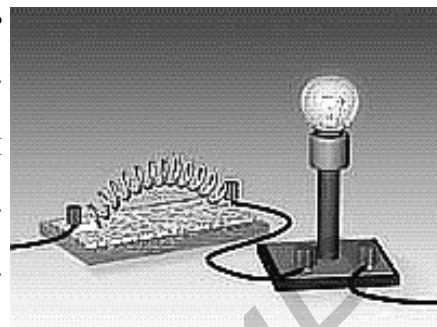


Рис. 1.11

Из проведенного опыта следует вывод: *последовательное включение в цепь дополнительного проводника всегда приводит к уменьшению мощности тока.*

Тепловое действие тока можно объяснить ударами электронов об ионы кристаллической решетки. Следовательно, если накал спирали лампочки уменьшился, значит, уменьшился поток электронов через ее спираль. В таком случае говорят, что уменьшилась сила тока. Итак, *под изменением силы тока понимают изменение количества электронов, проходящих через поперечное сечение металлического проводника за единицу времени.*

Тогда можно сделать вывод из опыта с лампочкой и проволоками: *дополнительный проводник, последовательно включенный в цепь, уменьшает в ней силу тока.* Другими словами, *проводник оказывает току сопротивление.* Разные проводники (отрезки проволоки) оказывают току различное сопротивление.

В чем же причина электрического сопротивления? Ток в металлическом проводнике – это направленное движение электронов, которое сопровождается их соударениями с ионами кристаллической решетки металла. На эксперименте установлено, что во всех кристаллах электроны совершенно одинаковы, а ионы (их размеры, порядок и плотность расположения) различны. Именно поэтому различные металлы имеют различное электрическое сопротивление.

Итак, *сопротивление проводника зависит от рода вещества*, из которого этот проводник изготовлен. Есть ли другие причины, влияющие на сопротивление проводника?

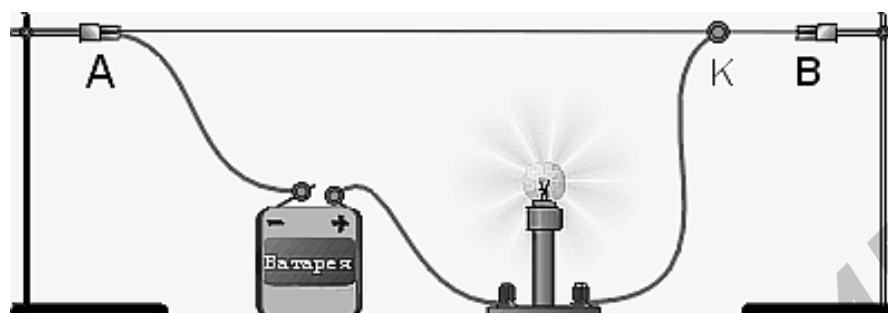


Рис. 1.12

Рассмотрим схему, изображенную на рис. 1.12. Буквами А и В обозначены концы тонкой никелиновой проволоки, а буквой К – подвижный контакт. Если контакт двигать вдоль проволоки, то будет изменяться длина участка, который включен в цепь (участок АК). При положении контакта К ближе к А лампочка горит ярче, чем в положении около В. Из этого можно сделать вывод, что *изменение длины проводника, включенного в цепь, приводит к изменению его сопротивления*.

Существуют специальные приборы – *реостаты*. Реостат – электрический прибор, сопротивление которого можно изменять. Реостаты служат для регулирования тока в цепи. Принцип их действия такой же, как и в рассмотренном опыте с проволокой. Отличие состоит в том, что для уменьшения размеров реостата проволоку наматывают на фарфоровый цилиндр, а подвижный контакт может перемещаться по металлическому стержню, который является проводником (рис. 1.13).

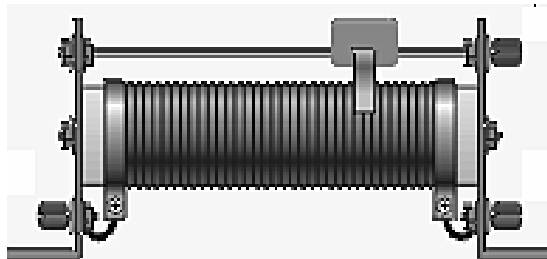


Рис. 1.13

Сопротивление проводника зависит также и от *площади его поперечного сечения*. При ее увеличении сопротивление проводника уменьшается. Сопротивление проводников также изменяется *при изменении их температуры*.

Контрольные вопросы

1. Какие характеристики проводника влияют на его электрическое сопротивление?
2. Что такое реостат?

§ 1.5. Сила тока

В предыдущем параграфе было отмечено, что под изменением силы тока понимают изменение количества электронов, проходящих через металлический проводник за единицу времени. Теперь обобщим понятие силы тока на случай использования любого проводника.

Ток – это направленное движение заряженных частиц: ионов или электронов. Именно они являются носителями (переносчиками) заряда. Следовательно, под силой тока удобнее понимать не количество заряженных частиц, протекающих через проводник за единицу времени, а количество «переносимого» ими заряда.

Сила тока – количественная характеристика, определяющая величину заряда, проходящего через поперечное сечение проводника за единицу времени. Математически это определение записывается в виде формулы

$$I = \frac{q}{t},$$

где I – сила тока (А), q – заряд (Кл), t – время (с).

Для измерения силы тока используют специальный прибор – *амперметр*. Его включают в разрыв цепи в том месте, где нужно измерить силу тока. Внешний вид демонстрационного амперметра дан на рис. 1.14.

Единица силы тока – 1 *ампер* (1 А = 1 Кл/с). Для установления этой единицы используют магнитное действие тока. Оказывается, что проводники, по

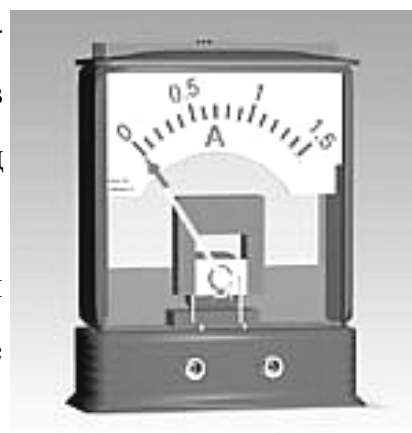


Рис. 1.14

которым текут параллельные одинаково направленные токи, притягиваются друг к другу. Это притяжение тем сильнее, чем больше длина этих проводников и меньше расстояние между ними. За 1 ампер принимают силу такого тока, который вызывает между двумя тонкими бесконечно длинными параллельными проводниками, расположенными в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, притяжение силой $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр их длины.

Измерим силу тока на различных участках *последовательной* цепи, состоящей из реостата и лампочки. Сначала включим амперметр между реостатом и лампочкой (рис. 1.15, а), а затем – между лампочкой и источником тока (рис. 1.15, б, в).

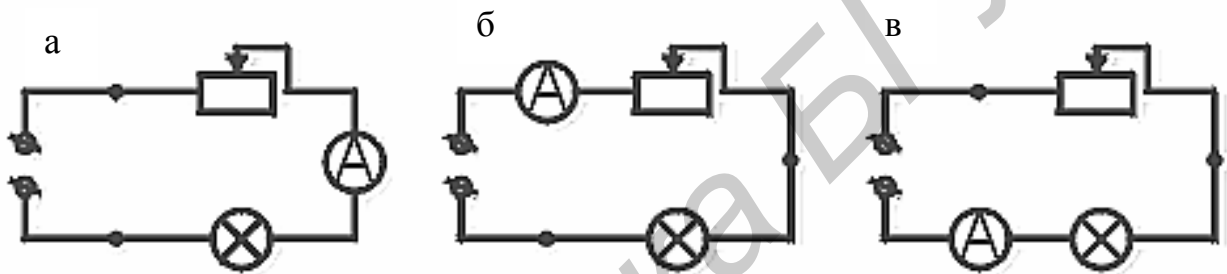


Рис. 1.15

Измерения показывают, что на всех участках цепи с последовательным соединением проводников сила тока одинакова. Она такой останется, если движок реостата переставить и изменить силу тока:

$$I_{\text{об}} = I_1 = I_2 = K.$$

Измерим теперь силу тока на различных участках цепи с *параллельным* соединением проводников (рис. 1.16), например лампочек.

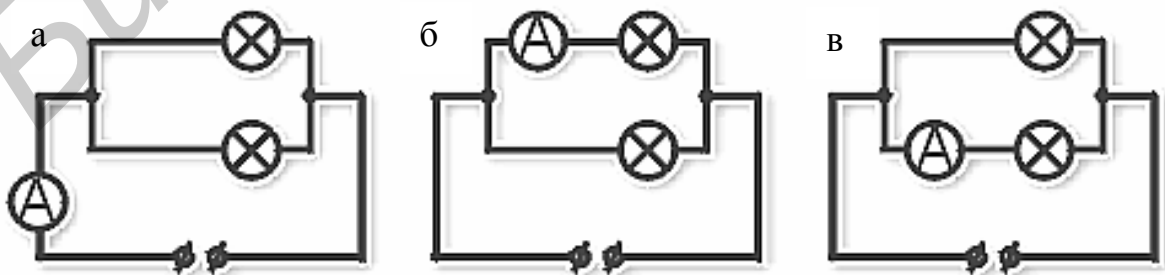


Рис. 1.16

Разветвлением называют место в цепи, в котором число токов входящих и выходящих разное. Измерения показывают, что сила входящего тока равна сумме сил токов выходящих из узла:

$$I = I_1 + I_2 + \dots$$

Контрольные вопросы

1. Что такое электрический ток?
2. Что является количественной мерой тока?
3. Сформулируйте правило токов для разветвления проводников.

§ 1.6. Напряжение и мощность тока

Известно, что мощность тока тем больше, чем больше сила тока. Посмотрите на рис. 1.17. Через обе лампочки проходит одинаковый ток 0,4 А. Но большая лампа горит ярче, то есть работает с большей мощностью, чем маленькая. Получается, что мощность может быть различной при одинаковой силе тока?

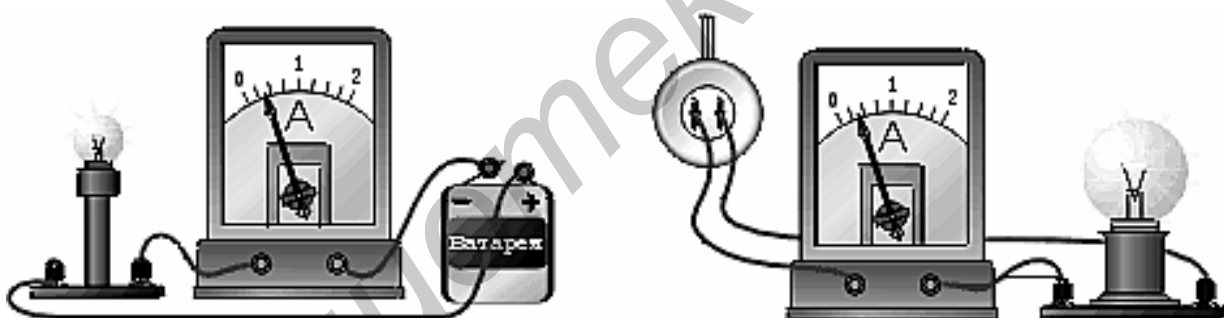


Рис. 1.17

Кроме силы тока *мощность* зависит еще от одной физической величины – *электрического напряжения*. В нашем случае напряжение, создаваемое выпрямителем, меньше напряжения, создаваемого городской электросетью. Поэтому при равенстве сил тока мощность тока в цепи с меньшим напряжением оказывается меньше.

Зависимость электрической мощности сразу от двух величин в физике представляют произведением:

$$P = I \cdot U,$$

где P – мощность тока, Вт; I – сила тока, А; U – электрическое напряжение, В.

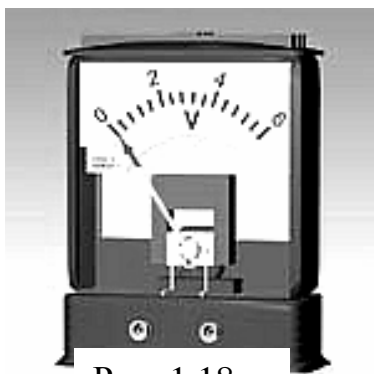


Рис. 1.18

По международному соглашению единицей электрического напряжения служит 1 вольт. Это такое напряжение, которое при силе тока 1 А создает ток мощностью 1 Вт.

Для измерения напряжения используют специальный прибор – *вольтметр*. Его всегда подключают параллельно к концам того участка цепи, на котором хотят измерить напряжение. Внешний вид школьного демонстрационного вольтметра показан на рис. 1.18.

Последовательным образом измерим напряжение на различных участках цепи, состоящей из реостата и лампочки (рис. 1.19). То есть сначала измерим напряжение на всем соединении (рис. 1.19, а), затем на лампочке (рис. 1.19, б), наконец, напряжение на реостате (рис. 1.19, в).

Последовательным образом измерим напряжение на различных участках цепи, состоящей из реостата и лампочки (рис. 1.19). То есть сначала измерим напряжение на всем соединении (рис. 1.19, а), затем на лампочке (рис. 1.19, б), наконец, напряжение на реостате (рис. 1.19, в).

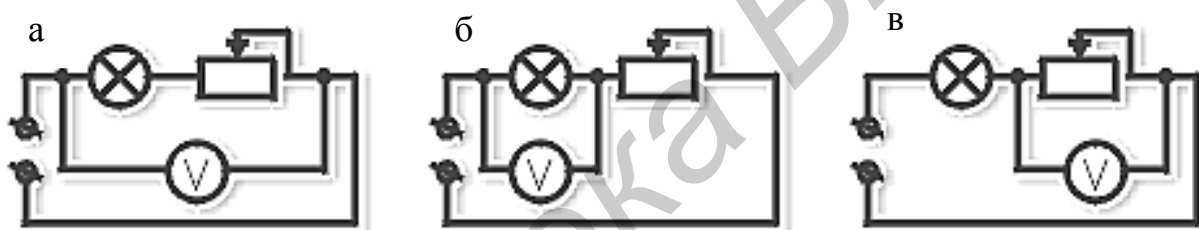


Рис. 1.19

Опыт показывают, что в цепи с последовательным соединением проводников напряжение на всем соединении равно сумме напряжений на отдельных проводниках:

$$U_{\text{посл}} = U_{\text{л}} + U_{\text{р}}$$

Исследуем величины напряжений на различных участках цепи с параллельным соединением проводников (рис. 1.20), например лампочек.

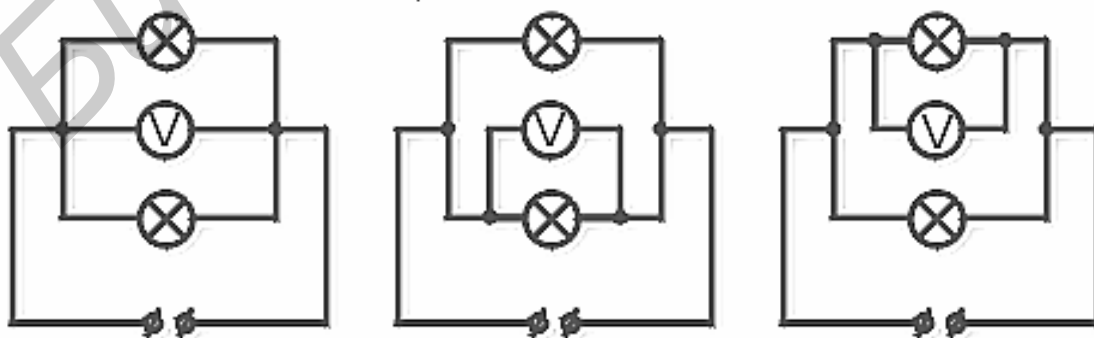


Рис. 1.20

В итоге получим, что в цепи с параллельным соединением проводников напряжение на каждом из проводников равно напряжению на всем соединении:

$$U_{\text{пар}} = U_{\text{л1}} = U_{\text{л2}}.$$

Контрольные вопросы

1. От каких величин зависит электрическая мощность?
2. Как подключают вольтметр при измерении напряжения?
3. Сформулируйте правило напряжений для разветвления проводников.

§ 1.7. Работа и мощность тока

Мощность тока вычисляется по следующей формуле:

$$P = I \cdot U.$$

С другой стороны, мощность можно определить как работу, производимую током в единицу времени:

$$P = \frac{A}{t}.$$

Выразим из этого уравнения тока:

$$A = I \cdot U \cdot t,$$

где A – работа тока, Дж; I – сила тока, А; U – электрическое напряжение, В; t – время прохождения тока, с. Единица измерения работы – 1 Дж.

Прохождение тока по проводнику всегда сопровождается физическим явлением – действием тока. Под выражением «ток совершает работу» будем понимать превращение электроэнергии в другие виды энергии. В таком случае работа тока – есть величина, показывающая количество электроэнергии, превращенной потребителем тока в другие виды энергии – тепло, свет, движение и т.д.

Для измерения работы тока служат специальные измерительные приборы – счетчики потребленной электроэнергии.

Обычно счетчики учитывают израсходованную электроэнергию не в джоулях, а в более крупных единицах работы – киловатт-часах. Например, счетчик показывает значение 254,7 кВт·ч.

Найдем связь этой единицы работы с более привычной нам единицей измерения – джоулем:

$$1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 1000 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 1000 \text{ Дж/с} \cdot 3600 \text{ с} = 3\,600\,000 \text{ Дж} = 3,6 \text{ МДж}.$$

Формула $A = I \cdot U \cdot t$ поможет выяснить, в чем состоит физический смысл напряжения. Найдем его из формулы

$$U = \frac{A}{I \cdot t} = \frac{A}{q}.$$

Следовательно,

$$1 \text{ В} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{А} \cdot \text{с}}.$$

Отсюда видно, что 1 вольт – это такое напряжение, при котором ток силой 1 ампер способен за 1 секунду производить 1 джоуль работы. Другими словами, напряжение показывает работу, которую каждую секунду совершают силы электрического поля для поддержания в цепи тока силой 1 ампер.

Кроме того, если использовать, что

$$q = I \cdot t,$$

то 1 вольт может рассматриваться как такое напряжение, при котором работа сил электрического поля при перемещении по проводнику заряда в 1 Кл будет равна 1 Дж.

На основании этого рассуждения можно сказать, что *электрическое напряжение является одной из характеристик электрического поля, создающего в проводнике ток.*

Контрольные вопросы

1. Объясните выражение «ток совершает работу».
2. Определите величину напряжения в 1 вольт.

§ 1.8. Закон Ома

Соберем электрическую цепь по схеме, изображенной на рис. 1.21: источник тока, реостат, амперметр, вольтметр и два резистора (например проволочных) с различными сопротивлениями.

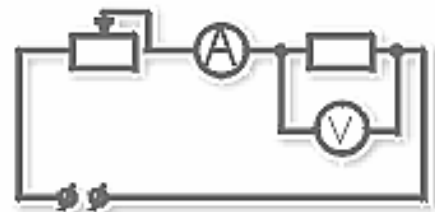


Рис. 1.21

Передвигая ручку реостата, поочередно установим силу тока 0,4; 0,6; 0,8 и 1 А. Запишем показания вольтметра, подключенного к резистору.

| | 1-й резистор | | | | 2-й резистор | | | |
|------|--------------|-----|-----|---|--------------|-----|-----|---|
| I, А | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
| U, В | 1,6 | 2,4 | 3,2 | 4 | 2,4 | 3,6 | 4,8 | 6 |

Заменяем первый резистор вторым и повторяем опыт, в итоге получим таблицу данных (рис. 1.22).

Рис. 1.22

Если разделить величину напряжения на соответствующее значение тока в цепи (то есть вычислить значения дробей U/I на рис. 1.22), то для каждого резистора получатся приблизительно одинаковые величины (рис. 1.23):

| R, Ом | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 6 |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | |

Рис. 1.23

На рис. 1.23 отношение U/I обозначено буквой R. Из опыта следует вывод: для каждого металлического проводника отношение напряжения к силе тока в нем есть величина постоянная, которая не зависит от напряжения и силы тока.

Заметим, что для разных резисторов значения R получились различными: 4 и 6 Ом. Этот факт указывает, что величина R является характеристикой не всей цепи, а каждого отдельного резистора.

Для выяснения физического смысла величины R соберем цепь по рис. 1.24.

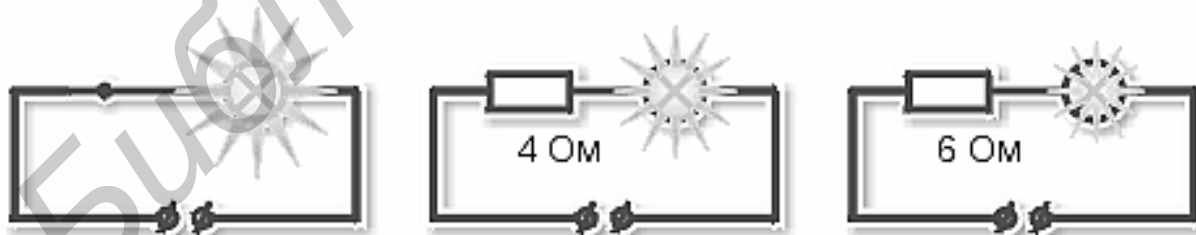


Рис. 1.24

Если сначала использовать первый резистор, у которого $R = 4$ Ом, а потом заменить его вторым, у которого $R = 6$ Ом, то лампочка станет гореть менее ярко. Уменьшение яркости лампочки говорит об уменьшении силы тока. Это происходит потому, что сопротивление второго резистора больше.

Итак, величиной R можно характеризовать электрическое сопротивление проводника. Единица электрического сопротивления – 1 Ом, то есть это сопротивление такого проводника, в котором возникнет ток 1 А, если на концы проводника подано напряжение 1 В. Связь между величинами R , U , I обычно записывается в виде следующей формулы, известной под названием закон Ома:

$$U = I \cdot R,$$

где I – сила тока на участке цепи, А; U – приложенное напряжение, В; R – сопротивление участка цепи, Ом.

Откуда следует, что при постоянном сопротивлении проводника *напряжение на нем прямо пропорционально сила тока в проводнике.*

Контрольные вопросы

1. Объясните уменьшение яркости горения лампочки при изменении сопротивления проводника.

2. Сформулируйте закон Ома.

Задача 1.1

Четыре лампы накаливания сопротивлением 3 Ом каждая включены в цепь постоянного напряжения 12 В (рис. 1.25). Найти величину тока через каждую лампу.

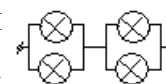


Рис. 1.25

Задача 1.2

Сопротивления в 180 и 270 Ом соединены параллельно. На сколько процентов ток в первом сопротивлении больше, чем во втором?

§ 1.9. Закон Джоуля – Ленца

В XIX веке независимо друг от друга англичанин Д. Джоуль и русский ученый Э. Ленц изучали нагревание проводников электрическим током и экспериментальным путем установили следующий закон: *количество теплоты, выделяющееся в проводнике с током, прямо пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.*

Получим закон Джоуля – Ленца теоретическим путем. Используя закон Ома, запишем формулу для вычисления работы тока $A = I \cdot U \cdot t$ в двух других формах:

$$A = I^2 \cdot R \cdot t, A = U^2 \cdot t / R.$$

В левых частях равенств стоит величина работы тока. Выясним, как она связана с количеством теплоты, выделяющимся в проводнике с током.

Тепловое действие тока объясняется ударами электронов об ионы кристаллической решетки, в результате чего часть кинетической энергии электронов передается ионам, и их колебания усиливаются. Выясним теперь, что происходит с внутренней энергией проводника. Если ток в цепи только что включили, то проводник будет постепенно нагреваться, а его внутренняя энергия – увеличиваться. По мере роста температуры будет возрастать величина разности между температурой проводника и температурой окружающей среды. Тогда будет возрастать и мощность теплоотдачи проводника в окружающую среду. Через некоторое время это приведет к тому, что температура проводника перестанет увеличиваться.

С этого момента внутренняя энергия проводника перестанет изменяться, это означает, что *работа тока полностью превращается в теплоту*. То есть

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t.$$

Эта формула и была получена Джоулем и Ленцем опытным путем.

На рис. 1.26 показана схема установки, при помощи которой можно экспериментально проверить справедливость закона Джоуля – Ленца. Силу тока измеряют амперметром, сопротивление проводника вычисляют, используя показания вольтметра.

Термометром измеряют повышение температуры жидкости в калориметре. По формулам

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \text{ и } Q = c \cdot m \cdot \Delta t$$

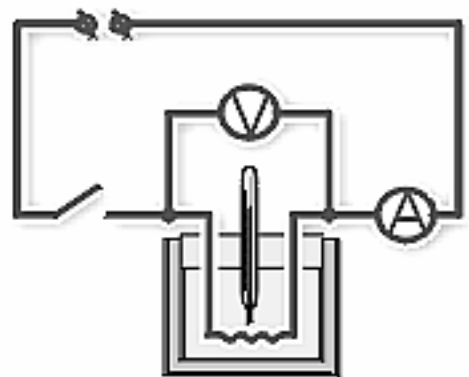


Рис. 1.26

подсчитывают количества теплоты. Теоретически оба значения должны совпадать. Это и проверяют на опыте.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Джоуля – Ленца.
2. Как можно экспериментально проверить правильность закона Джоуля – Ленца?

Задача 1.3

Во сколько раз уменьшилась мощность проволочного сопротивления, если его длина сократилась на 20 %, при неизменном токе?

Задача 1.4

Найти отношение мощностей лампы при напряжении 24 и 16 В, считая ее сопротивление неизменным.

§ 1.10. Электрический ток в вакууме

Обычно под вакуумом понимают состояние газа при давлениях ниже атмосферного. Таким образом, понятия «вакуум» и «разреженный газ» оказались синонимами. Теперь же при изучении электрических явлений необходимо уточнить определение вакуума.

В газах при обычных условиях (комнатная температура, атмосферное давление) молекулы хотя и расположены на больших расстояниях, однако они очень часто соударяются между собой. Подсчитано, что каждая молекула воздуха ежесекундно испытывает несколько миллиардов столкновений со своими «соседками». Если же газ заключить в сосуд и постепенно его откачивать, то плотность газа можно уменьшить настолько, что соударения молекул друг с другом будут происходить реже, чем со стенками сосуда. Такое состояние газа называют *высоким (глубоким) вакуумом*. Состояние газа, при котором частота соударений молекул друг с другом примерно равна частоте соударений молекул со стенками сосуда, называется *средним вакуумом*. Под *низким вакуумом*, как правило, понимают состояние газа при его давлениях ниже атмосферного.

Рассмотрим существование тока в глубоком вакууме. Для этого познакомимся сначала с явлением *термоэлектронной эмиссии*. Термоэлектронная эмиссия – явление испускания электронов нагретыми телами. Для начала рассмотрим опыт с особой электронной лампой – вакуумным диодом. На первый взгляд диод похож на обычную лампу накаливания (рис. 1.27), но кроме вольфрамовой спирали К (катода) он в верхней части содержит еще и дополнительный электрод А (анод).

Из стеклянной колбы диода воздух откачан до состояния глубокого вакуума. Диод включен последовательно в цепь, состоящую из амперметра

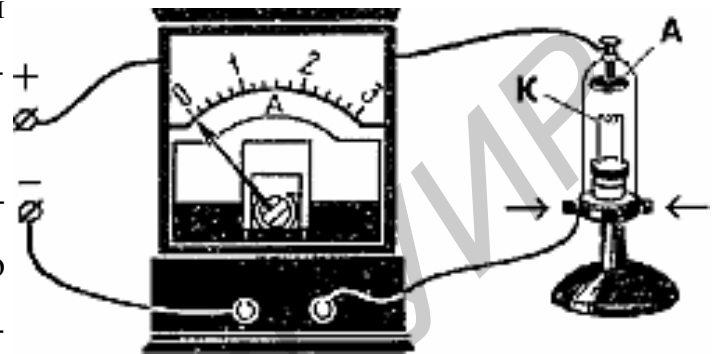


Рис. 1.27

и источника тока (на рис. 1.27 показаны лишь его клеммы «+» и «-»).

Так как между катодом и анодом лампы находится вакуум, в котором нет подвижных заряженных частиц, то и ток в цепи отсутствует – амперметр показывает ноль. Присоединим к клеммам спирали (указаны стрелками) аккумулятор с реостатом. Если, передвигая ручку реостата, нагреть спираль до красного цвета, то амперметр отметит появление слабого тока. Нагревая спираль сильнее, до «белого цвета», можно наблюдать усиление тока.

Обратите внимание, что спираль лампы присоединена к *отрицательному* полюсу источника тока. Повторим опыт, изменив полярность подключения источника. Обнаружим, что вне зависимости от степени накала спирали амперметр отметит отсутствие тока. Из нашего опыта следует вывод: *вакуумный диод обладает свойством пропускать через себя ток только в одном направлении*. Объясним это свойство.

Твердые металлы состоят из плотно расположенных положительных ионов, между которыми находится «электронный газ». Двигаясь во всевозможных направлениях, некоторые электроны могут вылететь за пределы металла. Так как поверхностный слой ионов металла имеет положительный заряд, то, при-

тягивая вылетающие электроны, он заставит вернуться их обратно (рис. 1.28). Однако, при нагреве металла до высокой температуры увеличивается скорость движения его электронов и соответственно их кинетическая энергия. Теперь она оказывается достаточной для того, чтобы совершить работу выхода из металла: электроны, преодолев притяжение его ионов, переходят в вакуум.

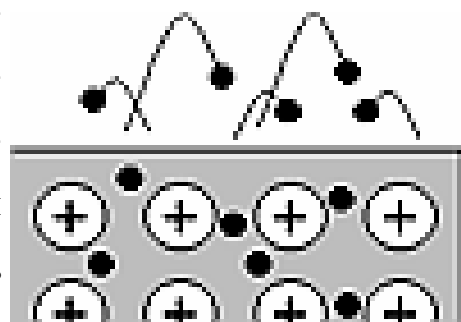


Рис. 1.28

Вылетевшие электроны притягиваются к аноду диода (так как он подключен к «+» источника тока) и образуют *электрический ток в вакууме*. Если же анод подключить к «-» источника тока, то вылетающие из спирали электроны будут отталкиваться от такого «анода» и ток в диоде будет отсутствовать.

Электронно-лучевая трубка

Из § 1.10 известно, что ток в вакууме может существовать за счет явления электронной эмиссии с поверхности отрицательно заряженного электрода — катода. Это явление нашло применение не только в вакуумных диодах, но и в устройстве *электронно-лучевых* приборов. В качестве одного из таких приборов рассмотрим *электронно-лучевую трубку* (рис. 1.29) — основную деталь телевизоров и компьютерных дисплеев.

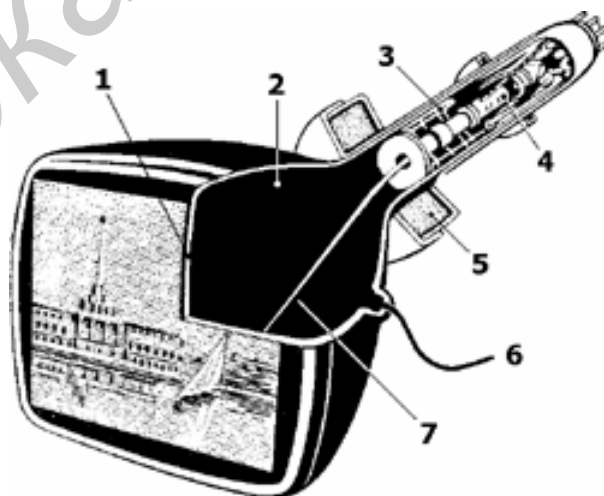


Рис. 1.29

Подобно диоду, электронно-лучевая трубка также является прибором, в котором создан глубокий вакуум. Катод 4 за счет явления термоэлектронной эмиссии испускает электроны, притягиваемые трубчатым анодом 3. Электрическое поле, существующее между катодом и анодом, придает электронам столь большую скорость, что они, пролетая сквозь отклоняющую систему 5, в виде электронного пучка 7 «бомбардируют» экран 1. Изнутри он покрыт особым

веществом – *люминофором*, способным светиться в том месте, где в него попадает электронный луч.

Электроны, ударившиеся о люминофор, отдают ему свою кинетическую энергию и поэтому резко уменьшают скорость. Если этим электронам позволить остановиться, они будут накапливаться на люминофоре, создавая на нем отрицательный заряд. Действуя на вновь подлетающие электроны, этот заряд будет отталкивать их, смещая электронный луч от нужного направления, что приведет к искажению изображения на экране. Чтобы этого не происходило, электронно-лучевая трубка изнутри покрыта особым электропроводящим веществом, по которому электроны «стекают» на провод 6, который присоединен к «+» источника тока и служит еще одним анодом трубки.

В рассмотренной электронно-лучевой трубке в качестве отклоняющей системы 5 использованы электромагниты, создающие быстро меняющееся магнитное поле, которое и направляет летящие электроны 7 в нужное место экрана. Поскольку электронный луч представляет собой направленное движение электронов, то его можно рассматривать как электрический ток. Позже узнаем об опытах, подтверждающих, что магнитное поле, воздействуя на ток, заставляет его отклоняться от прямого направления. Рассмотрим теперь электронно-лучевую трубку, где в качестве отклоняющей системы используются заряженные пластины. На рис. 1.30

видно, что такая *отклоняющая система* состоит из двух пар металлических пластин: вертикальных и горизонтальных.

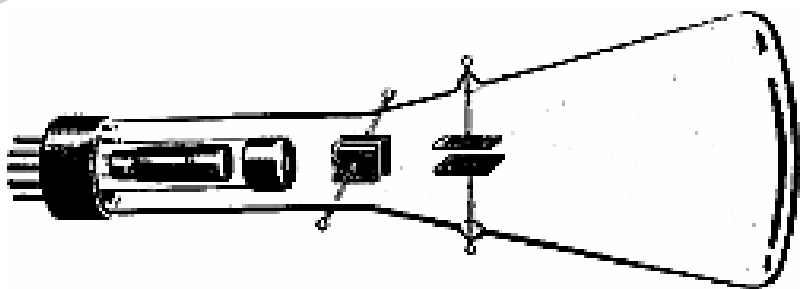


Рис. 1.30

Их называют *управляющими электродами*. Подавая напряжение на *вертикальные* пластины, можно заставить электронный луч отклониться по *горизонтали*; если же напряжение подано на *горизонтальные* пластины, то электронный луч будет смещаться по *вертикали*. Почему так происходит? Под-

ключим к горизонтальным пластинам источник тока: «+» к верхней пластине, а «-» к нижней. Электроны, пролетая между пластинами, будут отталкиваться от нижней и притягиваться к верхней. В результате электронный луч изогнется вверх, то есть сместится по вертикали. С вертикальными пластинами все аналогично.

Рассмотренная электронно-лучевая трубка используется в устройстве электронного осциллографа – прибора для изучения быстро меняющихся токов. На его экране может быть получен график переменного тока, существующего в электросети с напряжением 220 В. По графику видно, что *ток, существующий в электросети, не является постоянным. Этот ток – переменный.*

Контрольные вопросы

1. Что называется глубоким вакуумом?
2. Как работает электронно-лучевая трубка?
3. Что такое отклоняющая система ?

Задача 1.5

В газе между двумя электродами площадью 1 см^2 каждый образуются положительные и отрицательные ионы так, что их суммарное количество в секунду равно 10^{17} . Найти плотность силы тока, если все ионы достигают электродов за одинаковое время, а заряд каждого иона равен $3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

ГЛАВА 2. ЗАКОНЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

§ 2.1. Магнитное поле прямого тока

Рассмотрим магнитное действие тока еще раз. На штативе закрепим провод, концы которого можно подключить к источнику тока. Рядом с проводом разместим магнитную стрелку от компаса, надетую на иглу. Пока ток

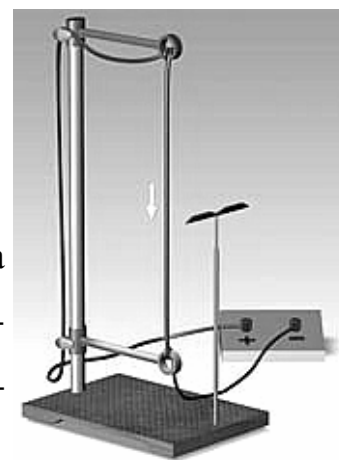


Рис. 2.1

не включен, установим приборы так, чтобы стрелка указывала на провод (рис. 2.1). При подключении концов провода к источнику постоянного тока стрелка повернется. Возьмем несколько магнитных стрелок и расставим их вокруг провода. Если теперь вклю-

чить ток, то стрелки повернутся определенным образом (рис. 2.2).

Если магнитные стрелки отклоняются от первоначального на-

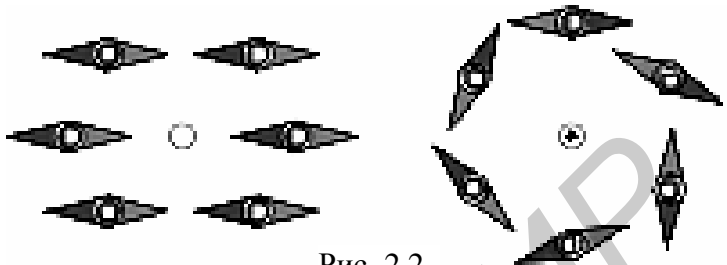


Рис. 2.2

правления, значит в этих точках пространства действуют какие-то силы. Другими словами, в пространстве вокруг провода с током существует силовое поле. Так как рассматривалось именно магнитное действие тока, то это значит, что в пространстве вокруг проводника с током существует магнитное поле.

Рассмотрим метод силовых линий, который можно применить как для описания электрических полей, так и для описания полей магнитных. *Силовыми линиями магнитного поля* назовем такие воображаемые линии, вдоль которых располагаются магнитные стрелки, помещенные в это поле. Например, на рис. 2.3 видно, что магнитные стрелки, помещенные на одинаковом расстоянии от прямого проводника с током, расположились в виде окружности.

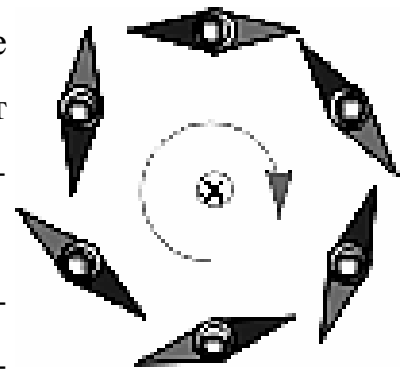


Рис. 2.3

Можно предположить, что и на другом расстоянии от проводника силовые линии магнитного поля тоже будут являться окружностями.

Проверим это на опыте. Пропустим прямой проводник через отверстие в листе картона и закрепим в штативе (рис. 2.4). Пустим по проводу ток силой от 5 до 10 А. Сверху на картон аккуратно насыпим мелкие кусочки железа. В результате увидим, что они расположатся в виде окружностей, «опоясывающих» проводник. Следовательно, наше предположение подтвердилось: силовые

линии магнитного поля прямого проводника с током являются концентрическими окружностями, окружающими проводник (рис. 2.5).



Рис. 2.4

Например, на рис. 2.5 расположение северных концов указывает нам, что силовые линии направлены по ходу часовой стрелки. Если же изменить полярность подключения источника тока, то силовые линии поля будут направлены против хода часовой стрелки (рис. 2.6). Другими словами, *направление силовых*

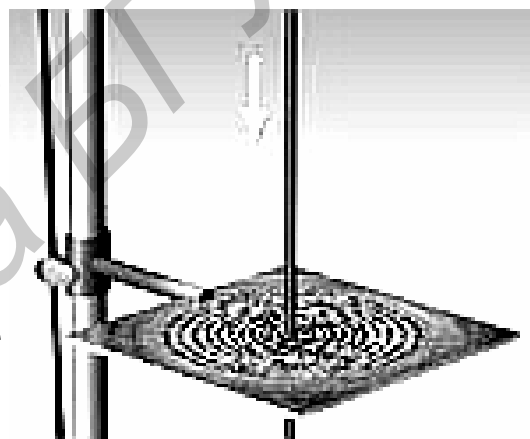


Рис. 2.5

линий магнитного поля проводника зависит от направления тока в этом проводнике.

Контрольные вопросы

1. Как будут располагаться железные кусочки в магнитном поле прямого проводника?
2. Что такое силовые линии магнитного поля?
3. Как изменяется направление линий при изменении направления тока в проводнике?

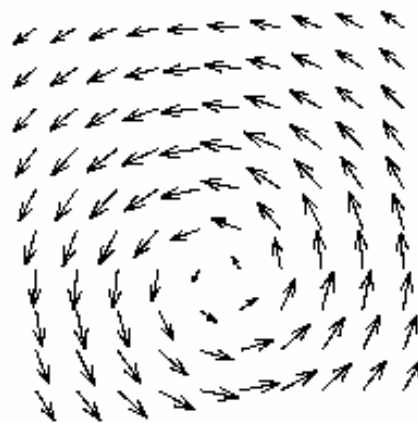


Рис. 2.6

§ 2.2. Сила Ампера и сила Лоренца

Характеристикой силового действия магнитного поля является *индукция магнитного поля*. Для прямого проводника с током I на расстоянии r от него она определяется формулой

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}.$$

Для определения направления вектора магнитного поля \vec{B} прямолинейного проводника можно пользоваться правилом правого винта: направление его вращения совпадает с направлением вектора \vec{B} , если при вращении винт перемещается в

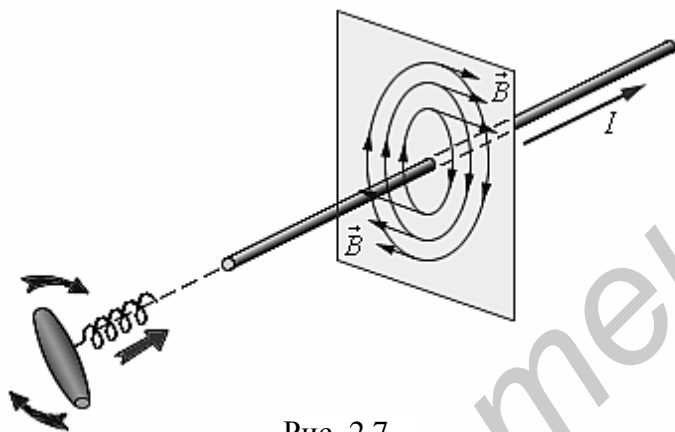


Рис. 2.7

направлении тока (рис. 2.7).

Французский физик А. Ампер наблюдал силовое взаимодействие двух проводников с токами и установил закон силового действия магнитного поля на отдельный прямолинейный участок проводника с током. Этот участок

проводника должен иметь длину ΔL , достаточно малую по сравнению с размерами областей неоднородности магнитного поля. Как показали опыты Ампера, сила, действующая на участок проводника, пропорциональна силе тока I , длине ΔL этого участка и синусу угла α между направлениями тока и вектора магнитной индукции:

$$F = I \cdot B \cdot \Delta L \cdot \sin(\alpha).$$

Сила Ампера достигает максимального по модулю значения, когда проводник с током ориентирован перпендикулярно линиям магнитной индукции.

В системе единиц СИ за единицу магнитной индукции принята индукция такого магнитного поля, в котором на каждый метр длины проводника при силе тока 1 А действует максимальная сила Ампера 1 Н. Эта единица называется *1*

тесла (Тл). Тесла – очень крупная единица. Магнитное поле Земли приблизительно равно $0,5 \cdot 10^{-4}$ Тл. Большой лабораторный электромагнит может создать поле с величиной магнитной индукции не более 5 Тл.

Сила Ампера направлена перпендикулярно вектору магнитной индукции и направлению тока, текущего по проводнику. Для определения направления силы Ампера обычно используют правило левой руки: если расположить левую руку так, чтобы линии индукции входили в ладонь, а вытянутые пальцы были направлены вдоль тока, то отведенный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник (рис. 2.8).

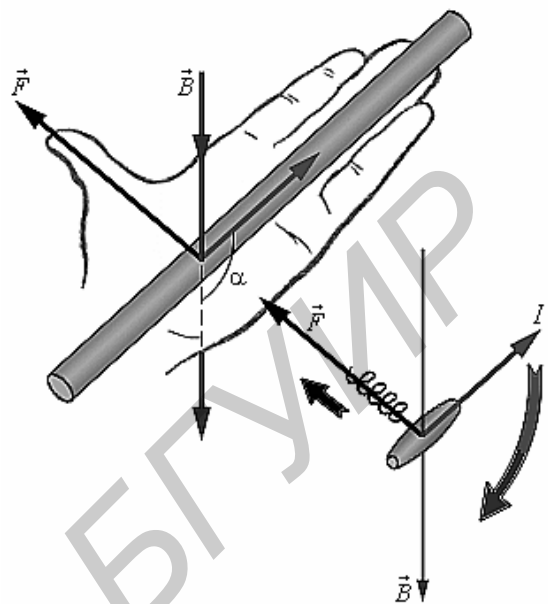


Рис. 2.8

Данное определение часто называют правилом правого винта. Одним из важных примеров магнитного взаимодействия токов является взаимодействие параллельных токов. Закономерности этого явления были экспериментально установлены Ампером. Если по двум параллельным проводникам электрические токи текут в одну и ту же сторону, то наблюдается взаимное притяжение проводников. В случае, когда токи текут в противоположных направлениях, проводники отталкиваются.

Если частица с электрическим зарядом движется со скоростью v в магнитном поле с индукцией магнитного поля \vec{B} , то на нее будет действовать со стороны поля сила величиной

$$F_{\text{Л}} = q \cdot B \cdot v \cdot \sin(\alpha).$$

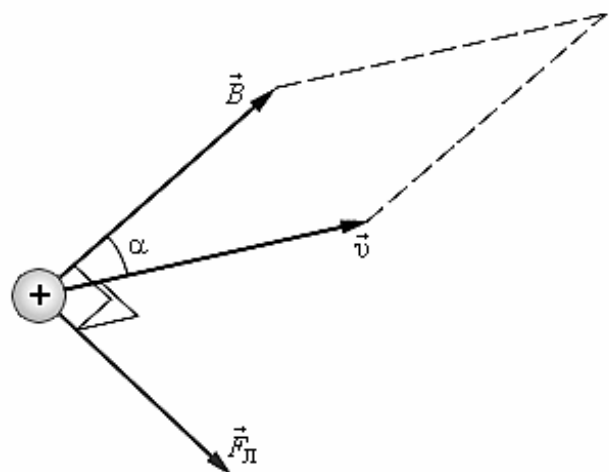


Рис. 2.9

Эту силу называют силой Лоренца. Угол α в этом выражении равен углу между скоростью \vec{v} и вектором магнитной индукции \vec{B} . Направление силы Лоренца, действующей на положительно заряженную частицу, так же, как и направление силы Ампера, может быть найдено по правилу левой руки или по правилу правого винта. Взаимное расположение векторов \vec{v} , \vec{B} и \vec{F}_L для положительно заряженной частицы показано на рис. 2.9. Сила Лоренца направлена перпендикулярно векторам \vec{v} и \vec{B} .

При движении заряженной частицы в магнитном поле сила Лоренца работы не совершает. Поэтому модуль вектора скорости при движении частицы не изменяется. Если заряженная частица движется в однородном магнитном поле под действием силы Лоренца, а ее скорость лежит в плоскости, перпендикулярной вектору, то частица будет двигаться по окружности. Сила Лоренца в этом случае играет роль центростремительной силы (рис. 2.10).

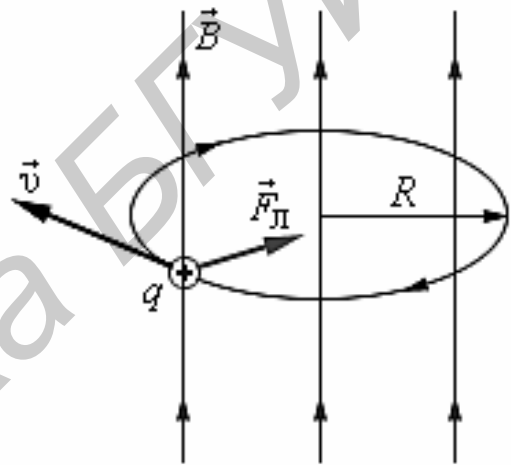


Рис. 2.10

Контрольные вопросы

1. Как определить направление вектора индукции магнитного поля прямого проводника с током?
2. Дайте определение силы Ампера.
3. Дайте определение силы Лоренца.

Задача 2.1

По проводящим рельсам (рис. 2.11), которые расположены на расстоянии 1 м, движется металлический стержень в магнитном поле с индукцией 0,01 мТл. Найти проекцию силы Ампера в микроныютонах (мкН) на ось OX при силе тока 0,5 А.



Рис. 2.11

Задача 2.2

Частица массой 1 мкг и зарядом 1 мкКл движется по окружности в однородном магнитном поле с индукцией 2 мТл. Определить угловую скорость частицы.

§ 2.3. Соленоид и электромагнит

Рассмотрим магнитное поле проводника, свернутого в виде спирали. Если длина спирали больше ее диаметра, то такую спираль в физике называют *соленоидом*. На рис. 2.12 изображен соленоид в виде катушки. Аналогично случаю прямого проводника силовые линии магнитного поля соленоида являются замкнутыми кривыми, охватывающими проводник.

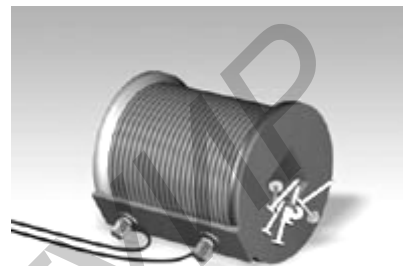


Рис. 2.12

На рис. 2.13 изображены силовые линии магнитного поля катушки конечной длины. Следует обратить внимание на то, что в центральной части катушки магнитное поле практически однородно и значительно сильнее, чем вне катушки. На это указывает густота линий магнитной индукции.

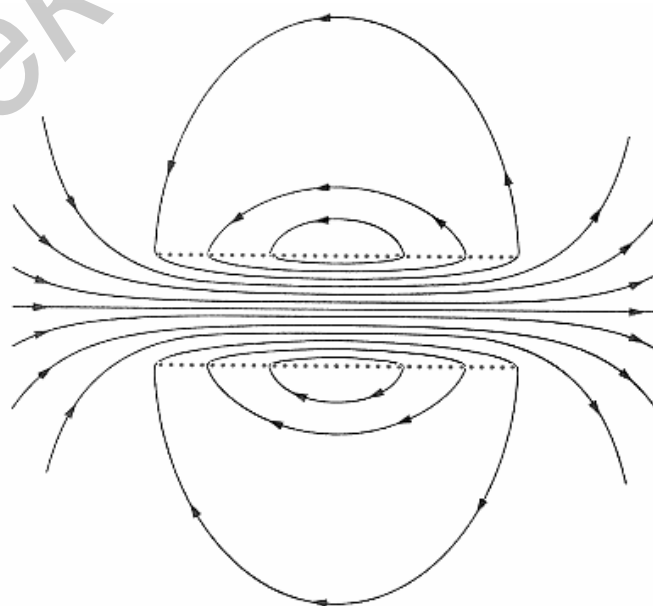


Рис. 2.13

В предельном случае бесконечно длинного соленоида однородное магнитное поле целиком сосредоточено внутри соленоида.

Поместив внутрь соленоида стальной стержень, получим простейший электромагнит. При прочих равных условиях магнитное поле электромагнита гораздо сильнее

магнитного поля соленоида. Чтобы проверить это, сделаем опыт. Подключив катушку с проволокой к источнику постоянного тока, опустим ее в сосуд с мелкими гвоздиками. Приблизительно сосчитаем количество гвоздиков, которые оказались на магните (см. рис. 2.12). Если же теперь в катушку вставить желез-

ный стержень (говорят: сердечник), то количество гвоздиков увеличится (рис. 2.14).

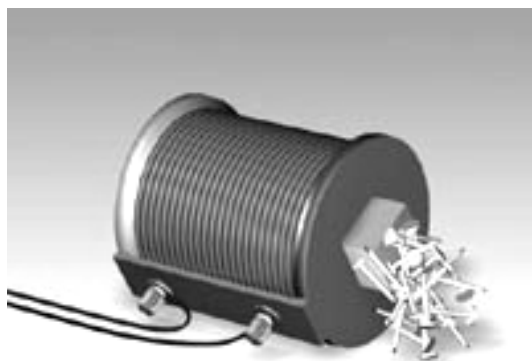


Рис. 2.14

Объясним усиление магнитного поля. Сначала, когда ток только что включили, его энергия расходуется именно на намагничивание сердечника. Но, намагнитившись, он создает собственное магнитное поле, которое накладывается на поле соленоида и тем самым усиливает его.

Рассмотрим другие причины, которые влияют на силу магнитного поля электромагнита. Ранее для наблюдения силовых ли-

ний магнитного поля прямого проводника с током был использован ток силой от 5 до 10 А. При меньших значениях тока гвоздики будут плохо намагничиваться и их цепочки получатся не очень четкими. Следовательно, магнитное поле электромагнита усиливается при увеличении силы тока в его проводнике (говорят: обмотке электромагнита).

При одной и той же силе тока поле электромагнита также можно усилить, увеличив число витков проводника в его обмотке. Это объясняется тем, что магнитные поля, создаваемые каждым из витков, накладываются друг на друга и тем самым образуют новое более сильное магнитное поле.

Соленоиды, особенно электромагниты, широко используются в технике. Рассмотрим одно из таких применений – *электромагнитное реле*. Оно предназначено для управления током большой мощности, используя ток малой мощности.

Взгляните на схему бассейна на рис. 2.15.

Для накачивания воды

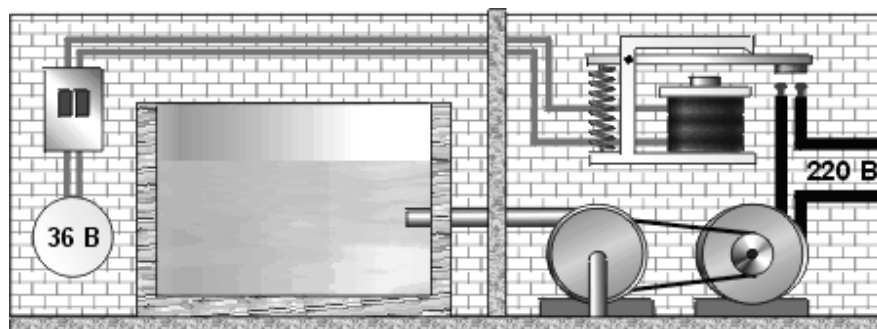


Рис. 2.15

используется насос, двигатель которого питается от сети с напряжением 220 В. Бассейн – это место с повышенной влажностью и, следовательно, с повышенной опасностью поражения электрическим током. Поэтому согласно правилам техники безопасности в таких местах не должно находиться электрооборудование с напряжением более 36 В. Рассмотрим, как электромагнитное реле помогает решить эту проблему.

Выключатель, которым управляется насос, расположен рядом с бассейном. А сам насос и электродвигатель находятся за стеной в отдельной комнате. Реле расположено над электродвигателем. Выключатель подает на обмотку реле напряжение 36 В. При замыкании этой цепи электромагнит притягивает стальную пластину. При этом контакты реле замыкаются, что приводит к включению электродвигателя. Если же выключатель разомкнуть, то сердечник электромагнита размагнитится и пружина оттянет стальную пластину от контактов. Цепь разомкнется, и двигатель насоса выключится.

Контрольные вопросы

1. Что такое соленоид?
2. Дайте определение электромагнита.
3. Объясните, как работает электромагнитное реле в электрической схеме бассейна.

§ 2.4. Постоянные магниты

В двух предыдущих параграфах были изучены магнитные поля, созданные проводниками с током. Рассмотрим теперь поля *постоянных магнитов*. В отличие от электромагнитов, которые приобретают магнитные свойства лишь при включении тока, постоянные магниты имеют эти свойства изначально и сохраняют их неограниченно долго.

Проделаем опыт с дугообразным магнитом, изображенным на рис. 2.16. Положим его в коробочку с мелкой

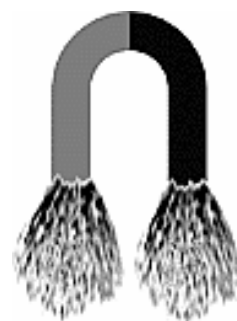
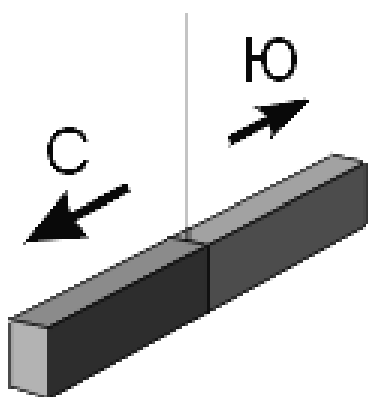


Рис. 2.16

железной пылью. Встряхнем коробочку и достанем магнит. Увидим, что пыль прилипает не ко всей поверхности магнита, а лишь к некоторым его частям – полюсам магнита. Любой магнит имеет не менее двух полюсов.

Подвесим полосовой магнит на длинной нити так, чтобы он мог свободно поворачиваться. Когда качания магнита прекратятся, он обязательно расположится так, что один из его полюсов укажет в сторону северной части горизонта, а другой – в сторону южной (рис. 2.17). Поэтому полюсы магнита называются



северным (С) и южным (Ю) полюсами.

Если поднести к подвешенному магниту второй магнит, то легко обнаружить, что их одноименные полюса отталкиваются, а разноименные – притягиваются. Этот опыт будет выглядеть эффектнее, если вместо тяжелых и неповоротливых полосовых магнитов использовать две легкие магнитные стрелки, свободно вращающиеся на остриях (рис. 2.18).

Рис. 2.17

Выясним теперь расположение силовых линий магнитного поля постоянных магнитов. Положим два полосовых магнита на стол и накроем их стеклом. Посыпав его пылью из железа, легко получить картины силовых линий.

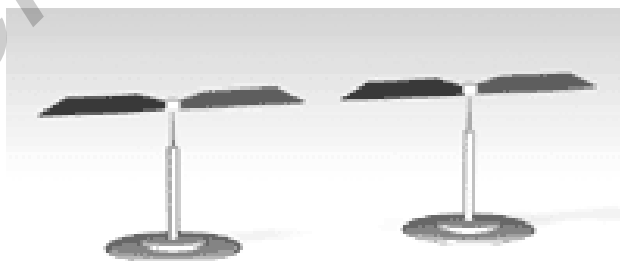


Рис. 2.18

На рис. 2.19 показано расположение силовых линий поля двух *одноименных* магнитных полюсов, а на рис. 2.20 – двух *разноименных* полюсов. Причем они могут быть как полюсами одного и того же магнита (например дугообразного), так и полюсами двух разных магнитов.

Наша планета Земля тоже является постоянным магнитом. Южный магнитный полюс Земли расположен вблизи северных границ Канады, между островами Мелвилл и Девон, в точке с координатами 77° с. ш. и 102° з. д. Север-

ный магнитный полюс лежит вблизи южного географического полюса, на краю Антарктиды, в точке с координатами 66° ю. ш. и 140° в. д.

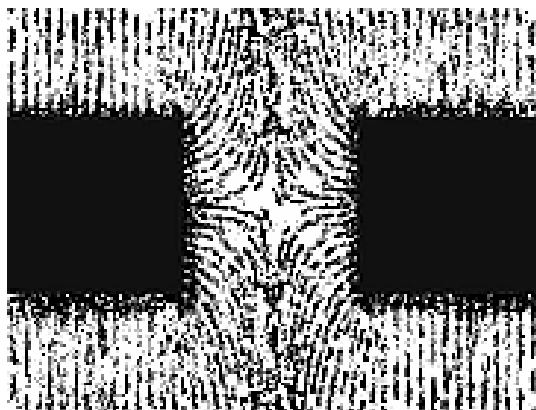


Рис. 2.19

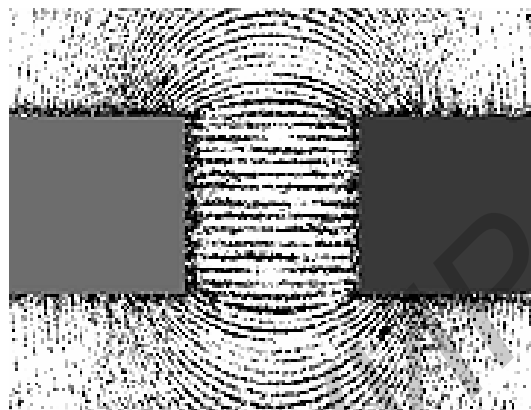


Рис. 2.20

Приведенные координаты свидетельствуют, что магнитные полюса Земли не совпадают с ее географическими полюсами (рис. 2.21). Это приводит к тому, что стрелка компаса показывает на Север не точно, а лишь приблизительно. Известно, что Солнце постоянно выбрасывает из себя потоки быстрых заряженных частиц: протонов, электронов и др. Они летят во всех направлениях, в том числе и к Земле. Направленный поток заряженных частиц называют электрическим током. Магнитное поле воздействует на проводники с электрическим током. Оно отклоняет их.

Магнитное поле Земли простирается далеко в Космос. Оно воздействует на космические токи, отклоняя их от густонаселенных регионов земного шара и

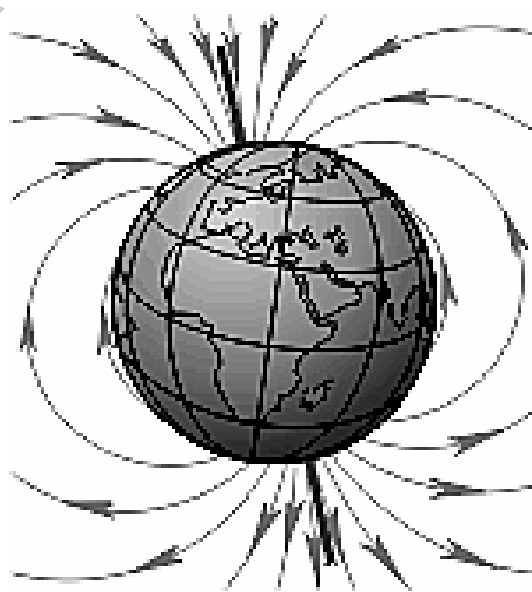


Рис. 2.21

направляя их в районы магнитных полюсов. В этих регионах Земли частицы влетают в верхние слои атмосферы, вызывая их ионизацию. Это приводит к возникновению красивейших явлений природы – *полярных сияний*.

Контрольные вопросы

1. Что происходит с полосовым магнитом, который подвешен на длинной нити в магнитном поле Земли?
2. Чем отличаются картины силовых линий на рис. 2.19 и рис. 2.20?
3. Что можно сказать о магнитном поле Земли?
4. Что происходит с заряженными частицами в магнитном поле Земли?

§ 2.5. Электротрансформатор

Человечество давно использует переменный электрический ток в промышленных масштабах. В странах Европы и Америки наибольшее распространение получил ток, меняющий свое направление 100–120 раз в секунду. Переменный ток одного напряжения способен легко преобразоваться в ток другого напряжения.

Например, величина напряжения, вырабатываемого электрогенераторами гидро- или теплоэлектростанций, лежит в пределах 10–20 кВ. Напряжение, при помощи которого выгодно передавать электроэнергию по проводам, лежит в пределах 100–1000 кВ. Напряжение, которое подводится к двигателям станков на заводах и фабриках, – 380–600 В. Как видите, для производства, передачи и использования электроэнергии нужно применять различные напряжения. Следовательно, существует потребность в трансформации (латинское «трансформо» – преобразую) электрического тока одного напряжения в ток другого напряжения. Для этого применяют устройства, называемые *электрическими трансформаторами*.

Чтобы понять, как работает трансформатор, рассмотрим возникновение и распространение в пространстве магнитного поля катушки, в которой течет переменный ток (рис. 2.22). По мере нарастания тока (точки А, В, С) линии магнитного поля катушки отодвигаются все дальше от нее. При убывании тока (точки С, D, E) линии приближаются к катушке.

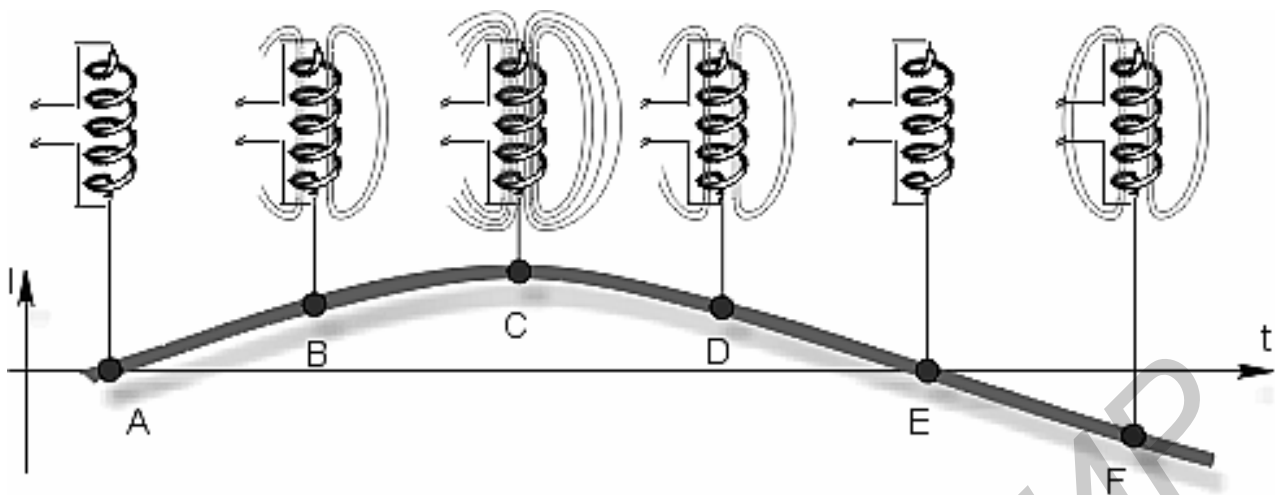


Рис. 2.22

При нарастании тока обратного направления (точки E, F) силовые линии вновь продвигаются в окружающее пространство. Поэтому если вблизи катушки поместить замкнутый проводник, то в нем будут возникать ЭДС индукции

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

и индукционный ток.

Чтобы получить наиболее сильный индукционный ток, в качестве второго проводника используют другую катушку (рис. 2.23), помещенную на общем сердечнике с первой. Такая конструкция и будет являться простейшим *электрическим трансформатором*. При подаче на его первичную (входную) обмотку

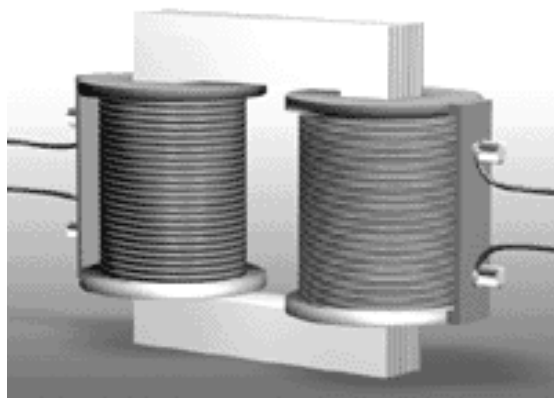


Рис. 2.23

напряжения U_1 на вторичной обмотке получаем напряжение U_2 . Оно будет больше первичного, если вторичная обмотка содержит больше витков, чем первичная обмотка.

$$U_1 = \varepsilon_{si} + I_1 \cdot R_1 -$$

действующее напряжение в первичной обмотке, которое складывается из величины ЭДС самоиндукции и падения напряжения на сопротивлении проводов

первичной катушки. Во вторичной обмотке индуцируется величина ЭДС индукции

$$\varepsilon_i = U_2 + I_2 \cdot R_2,$$

которая складывается из величины напряжения на обмотке и падения напряжения на сопротивлении проводов вторичной катушки.

КПД трансформаторов достигает 95–99 %. Это означает, что практически вся энергия (работа) тока, проходящего по первичной обмотке трансформатора, превращается в энергию (работу) индукционного тока, возникающего во вторичной обмотке, то есть

$$A_1 = A_2, I_1 \cdot U_1 \cdot t = I_2 \cdot U_2 \cdot t, I_1 \cdot U_1 = I_2 \cdot U_2,$$

Сила тока в первичной обмотке трансформатора во столько раз больше силы тока во вторичной его обмотке, во сколько напряжение в ней больше напряжения в первичной обмотке.

КПД трансформатора может быть определен, как

$$\eta = \frac{I_2 \cdot U_2}{I_1 \cdot U_1} \cdot 100 \% .$$

Трансформаторы, используемые в технике, могут быть устроены очень сложно, однако принцип их действия остается неизменным: *изменяющееся магнитное поле, созданное переменным током в первичной обмотке, пронизывая вторичную обмотку, индуцирует в ней переменный ток той же частоты, но другого напряжения.*

Контрольные вопросы

1. Как устроен трансформатор?
2. Как определить КПД трансформатора?

Задача 2.3

Определить величину ЭДС вторичной обмотки, если ЭДС первичной обмотки – 200 В, а коэффициент трансформации – 2.

Задача 2.4

Найти действующее значение силы тока во вторичной обмотке трансформатора с КПД, равным 81 %, если действующее значение напряжения в ней – 120 В. В первичной обмотке действующие значения напряжения и тока равны 400 В и 0,5 А соответственно.

§ 2.6. Катушка индуктивности

Проделаем опыт. Возьмем две одинаковые лампочки. Подключим их к источнику тока, используя реостат и катушку индуктивности (рис. 2.24). При замыкании выключателя лампа, соединенная с катушкой индуктивности, загорится на несколько

секунд позже, чем лампа, соединенная с реостатом. Теперь разомкнем выключатель. В этот момент обе лампы не погаснут, а вспыхнут еще ярче!

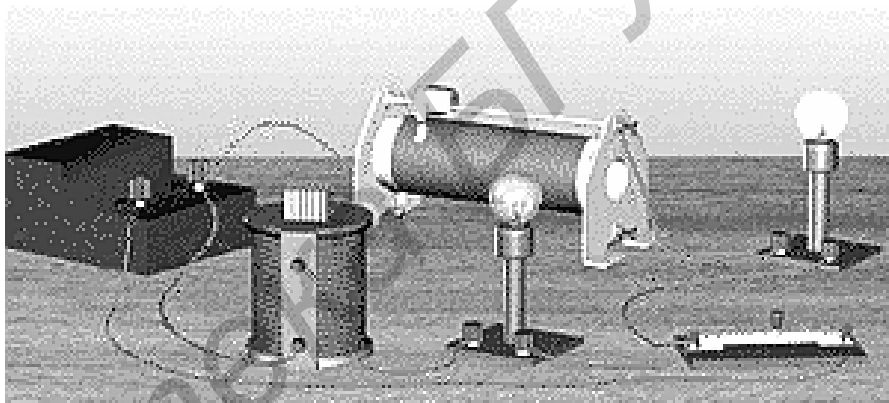


Рис. 2.24

Эта вспышка ламп будет очень кратковременной (рис. 2.25).

Более позднее загорание первой лампы объясняется так. При включении тока его энергия идет не только на нагревание спирали лампы, но и на создание магнитного поля вокруг катушки индуктивности.

Для этого требуется некоторое время. И лишь после этого энергия тока будет полностью превращаться в теплоту, разогревая

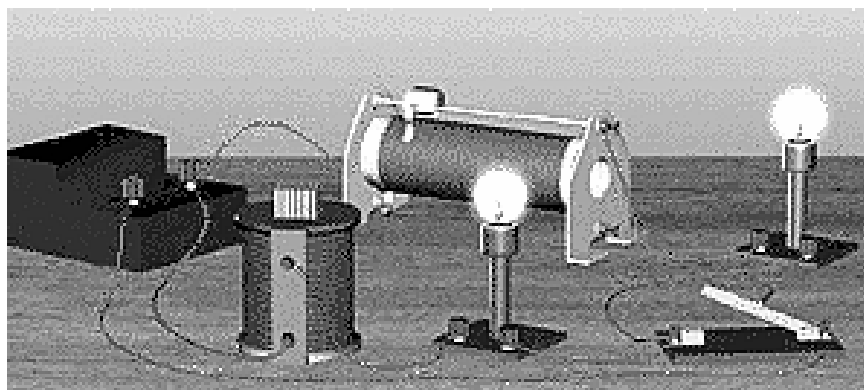


Рис. 2.25

спираль лампочки настолько, что она начинает светиться.

При выключении контакта ток уменьшается, поэтому ослабевает (то есть изменяется) и магнитное поле. Следовательно, происходит явление электромагнитной индукции. В катушке возникает индукционный ток, который, проходя через обе лампы, заставляет их вспыхнуть. Таким образом, энергия магнитного поля, запасенная катушкой индуктивности в момент замыкания выключателя, в момент его размыкания вновь превращается в энергию тока. Энергия магнитного поля катушки определяется по формуле

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2},$$

где L – индуктивность катушки; I – ток в ней.

Контрольные вопросы

1. В каком порядке загораются лампы в эксперименте с катушкой индуктивности?
2. От каких физических величин зависит энергия магнитного поля катушки?

§ 2.7. Колебательный контур

Если конденсатор и катушку индуктивности соединить вместе, то образуется электрическая цепь, которую называют колебательным контуром. Для знакомства с его свойствами сделаем опыты.

Соберем цепь по схеме рис. 2.26, а. Сначала конденсатор получает энергию от источника постоянного тока. При этом верхняя пластина заряжается положительно, а нижняя – отрицательно.

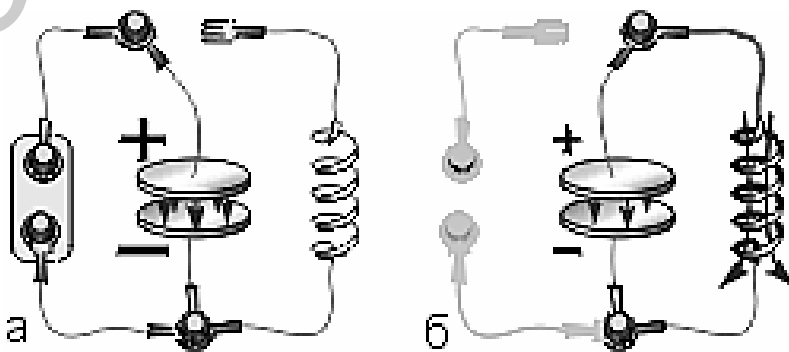


Рис. 2.26

Другими словами, на ней скапливается избыточное количество электронов. Переключим конденсатор на катушку индуктивности (рис. 2.26, б). Избыток электронов с нижней пластины конденсатора устремится через катушку к верхней пластине, и в цепи возникнет нарастающий электрический ток. В результате

этого катушка станет электромагнитом и начнет создавать вокруг себя магнитное поле.

Когда конденсатор разрядится, ток в контуре прекратится. Проверим эту гипотезу. Для этого повторим опыт, присоединив к концам катушки прибор осциллограф. На его экране увидим график зависимости напряжения от времени (рис. 2.27):

График (осциллограмма) показывает, что напряжение на катушке является не постоянной, а изменяющейся во времени величиной. Следовательно, в контуре колеблется сила тока и магнитное поле катушки.

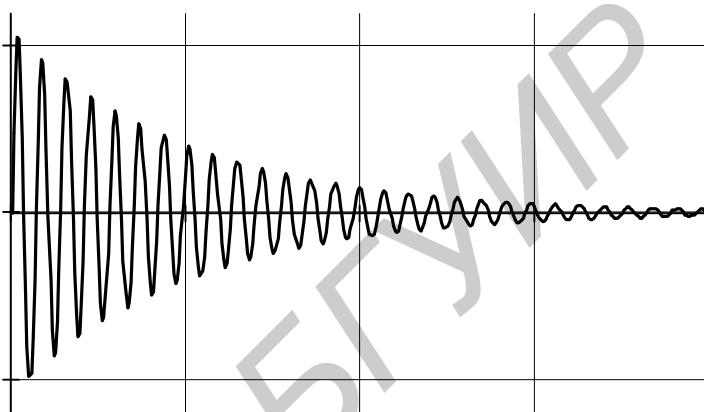


Рис. 2.27

Осциллограмма также показывает, что колебания являются *затухающими*. Так происходит потому, что катушка индуктивности и соединительные провода обладают электрическим сопротивлением. Поэтому согласно закону Джоуля – Ленца, энергия электрического тока будет постепенно превращаться в теплоту. По этой причине электрические колебания в контуре всегда являются затухающими.

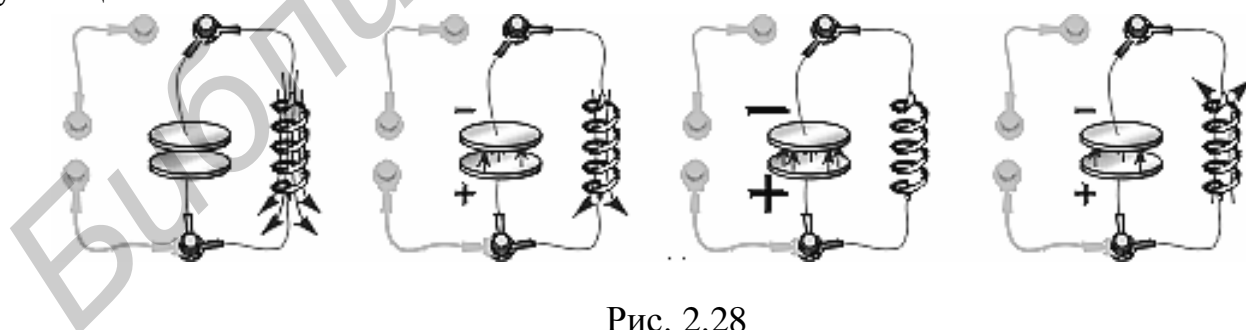


Рис. 2.28

Объясним, почему в контуре могут существовать колебания. Ток, возникающий при разрядке конденсатора, непостоянен, значит, и непостоянно и магнитное поле катушки. Нарастая, оно достигает максимума, когда конденсатор

полностью разрядится. К этому моменту энергия электрического поля конденсатора полностью превратится в энергию магнитного поля катушки.

Однако после разряда конденсатора ток в контуре не прекратится. Магнитное поле вокруг катушки начнет убывать, то есть изменяться (рис. 2.28). Из-за этого сразу же возникнет явление электромагнитной индукции. Оно приведет к появлению индукционного тока, и электроны из нижней пластины конденсатора продолжат движение через катушку к верхней пластине и вскоре придадут ей отрицательный заряд. Поскольку ранее эта пластина была положительно заряженной, то произойдет перезарядка конденсатора.

Теперь, когда конденсатор вновь заряжен, он может снова создавать ток, правда, уже противоположного направления (см. рис. 2.28). Так будет повторяться до тех пор, пока вся энергия, полученная конденсатором от источника тока, не превратится в теплоту.

Одной из характеристик колебаний является *период колебаний* – наименьшее время, за которое все величины, характеризующие процессы в колебательном контуре, вновь принимают значения, которые они имели в момент начала наблюдений. Единица измерения периода – *1 секунда*. Для колебательного контура период определяется по формуле Томсона:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C},$$

где L – индуктивность катушки, C – емкость конденсатора.

Величину, обратную периоду, называют *частотой колебаний*. Единица измерения частоты – 1 герц ($1 \text{ Гц} = 1/\text{с} = 1 \text{ с}^{-1}$). Частота колебаний в контуре зависит от размеров и формы конденсатора и катушки, а также от свойств среды внутри и вокруг них.

Контрольные вопросы

1. Из чего состоит электрический колебательный контур?
2. По какому закону изменяется напряжение на катушке индуктивности?
3. Дайте определение периоду колебаний.

Задача 2.5

Колебательный контур состоит из катушки индуктивности и двух одинаковых конденсаторов, включенных параллельно. Период собственных колебаний контура 20 мкс. Чему будет равен период, если конденсаторы включить последовательно? Ответ дать в микросекундах.

Задача 2.6

В колебательном контуре напряжение на конденсаторе меняется по закону

$$U = 220\cos(160t) \text{ В,}$$

где t – время в секундах.

Найти полную энергию колебаний в миллиджоулях (мДж), если емкость конденсатора равна 1 мкФ.

§ 2.8. Как получить электромагнитную волну

При электромагнитных колебаниях в колебательном контуре заряд на пластинах конденсатора периодически то увеличивается, то уменьшается. Следовательно, напряженность электрического поля, которое существует между пластинами, тоже периодически изменяется: увеличивается и уменьшается. С таким же периодом, как и изменение заряда на пластинах конденсатора, изменяется и величина индукции магнитного поля, создаваемого катушкой индуктивности.

Не надо думать, что между пластинами конденсатора существует *только* электрическое поле, а вокруг катушки индуктивности – *только* магнитное. В 1864 г. английский ученый Дж. Максвелл создал теорию, в которой показал, что электрическое поле и магнитное поле – лишь частные проявления единого *электромагнитного поля*. Они наблюдаются «по одиночке» лишь в том случае, если каждое из них не изменяется с течением времени. А поскольку электрическое поле между пластинами конденсатора непостоянно, как непостоянно и магнитное поле вокруг катушки индуктивности, то в пространстве вокруг колебательного контура обязательно существует переменное электромагнитное поле.

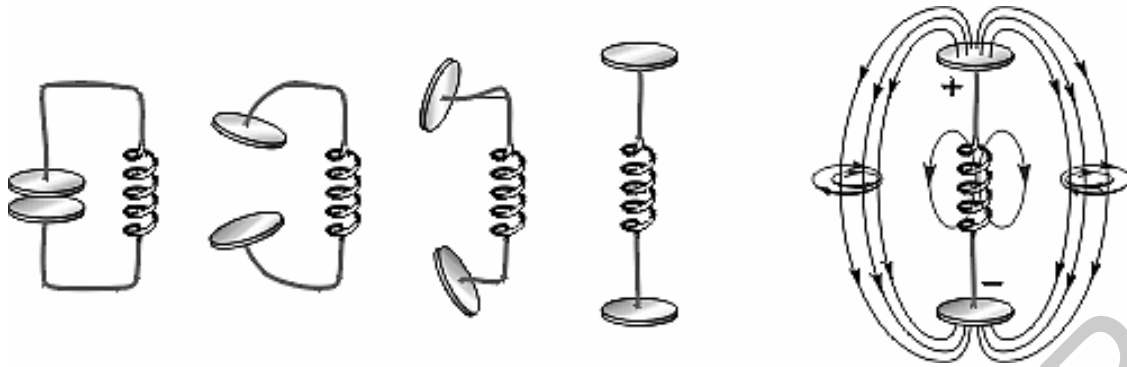


Рис. 2.29

Давайте будем постепенно отодвигать пластины конденсатора друг от друга (рис. 2.29). При этом электромагнитное поле, существовавшее между пластинами, «выходит» в окружающее пространство. Наличие пластин конденсатора уже не является обязательным. Провода, отходящие от катушки, превращаются в *антенну – устройство для излучения (или приема) электромагнитных волн*. Длина волны излучателя в вакууме определяется произведением величины скорости света на период колебаний:

$$\lambda = c \cdot T.$$

Контрольные вопросы

1. Существует ли в индукционной катушке только переменное магнитное поле?
2. Что такое антенна?
3. Как вычислить длину волны электромагнитного излучения?

Задача 2.7

Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 0,01 мкФ и катушки, индуктивность которой составляет 1/90 мГн. На какую длину волны настроен контур? Сопротивлением контура пренебречь.

Задача 2.8

Определить отношение длины электромагнитной волны в вакууме к длине волны в некоторой среде для одного и того же источника с частотой колебаний, равной 1,5 МГц. Длина волны в среде – 100 м.

§ 2.9. Как обнаружить электромагнитную волну

В предыдущем параграфе были рассмотрены *открытый колебательный контур*. Разумеется, в таком контуре свободные колебания будут затухать очень быстро, так как отсутствует устройство, способное накапливать заряды – конденсатор. Поэтому для создания в антенне незатухающих электрических колебаний используют специальное устройство – *генератор тока высокой частоты*. Рассмотрим опыты с таким генератором.

Присоединим к генератору антенну, состоящую из двух отрезков проволоки (рис. 2.30). Включенный генератор создаст вокруг антенны переменное электромагнитное поле. Оно будет распространяться в пространстве в виде электромагнитных волн. Изготовим вторую антенну, которую назовем принимающей, и подключим к ней небольшую лампочку. Если приблизить антенны параллельно друг другу, то увидим, что лампочка светится.

Объяснение этого опыта следующее. Переменное электромагнитное поле, созданное передающей антенной, воздействует на электроны, находящиеся во второй антенне. Под действием быстро меняющегося поля

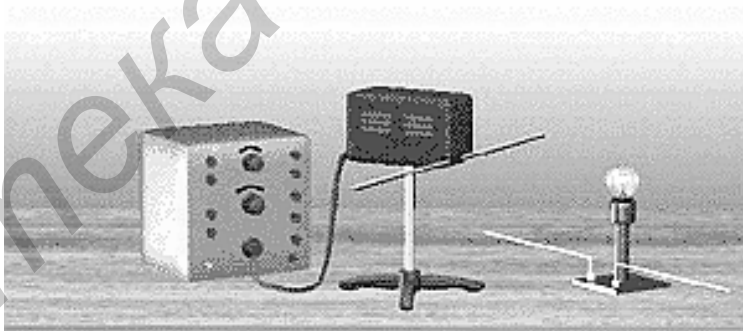


Рис. 2.30

электроны приходят в колебательное движение, смещаясь то к одному, то к другому концу антенны. Двигаясь внутри спирали лампочки, они вызывают ее нагревание и свечение.

Отодвинем принимающую антенну с лампочкой дальше от передающей антенны, присоединенной к генератору. Лампочка будет светиться слабее, так как энергия, излучаемая передающей антенной, будет больше рассеиваться в пространстве.

Если повернуть антенны под углом друг к другу, то также обнаружим уменьшение накала лампочки.

Контрольные вопросы

1. Что такое принимающая антенна?
2. Почему лампочка на принимающей антенне светится слабее при увеличении расстояния до передающей антенны?

§ 2.10. Свойства электромагнитных волн

Для изучения свойств электромагнитных волн воспользуемся генератором и приемником радиоволн частотой больше 1 кГц. Приборы снабжены *рупорами*, обеспечивающими направленное излучение и прием волн.

Отражение волн

Расположим рупоры генератора и приемника под некоторым углом друг к другу (рис. 2.31). Приемник покажет отсутствие сигнала. Поместим под рупорами металлическую пластину. Приемник отметит наличие сигнала, потому что



Рис. 2.31

электромагнитная волна, которая распространялась в диэлектрической среде (воздухе), отразилась от поверхности проводящей среды (металлической пластины, которая лежит на столе).

Преломление волн

Рупоры генератора и приемника расположим напротив друг друга, немного подняв вверх один из них (рис. 2.32). При включении генератора приемник покажет отсутствие сигнала. Поместим между рупорами предмет из специального пластика в форме куба. Приемник отметит наличие сигнала. Как

объяснить результаты опыта? На границах раздела двух диэлектрических сред (воздуха и пластика) наблюдается преломление электромагнитных волн.

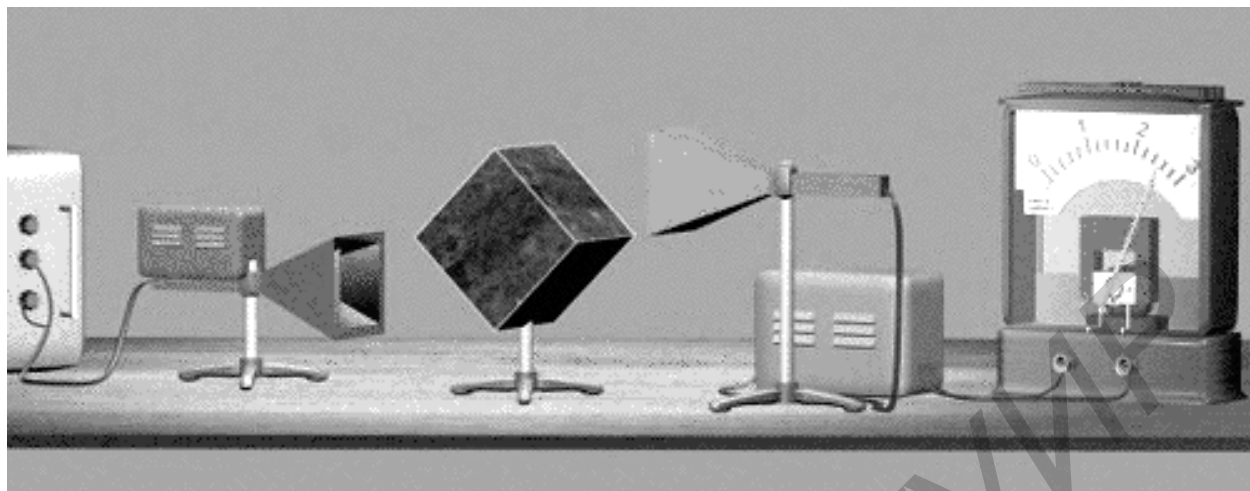


Рис. 2.32

Дифракция волн

Расположим рупоры напротив друг друга. При включении генератора приемник отметит наличие сигнала. Поместим вблизи приемного рупора металлический диск (рис. 2.33). Приемник покажет отсутствие сигнала. Передвинем диск на середину расстояния между рупорами. Приемник отметит наличие сигнала.

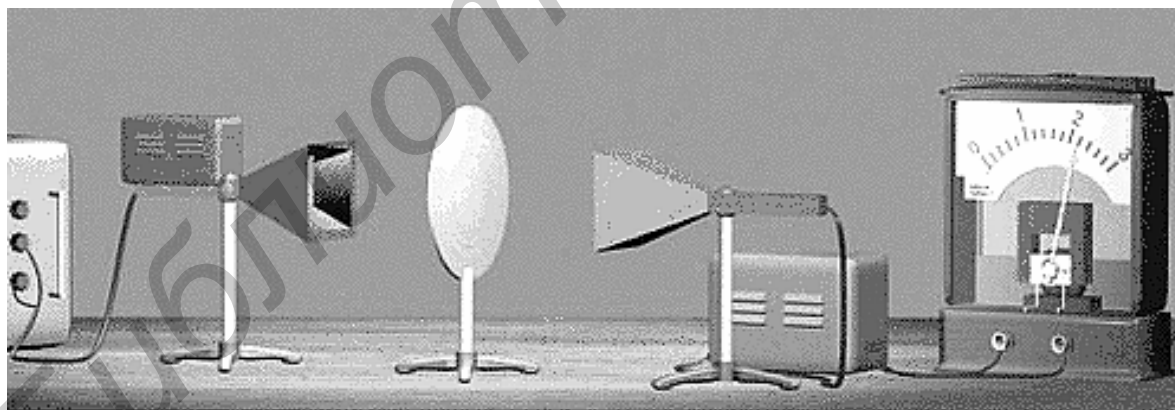


Рис.2.33

Почему это происходит? Если расстояние между диском и приемным рупором мало, то волна будет сильно отклоняться в сторону и не попадает в рупор. Когда отодвинем диск дальше, то волна сначала отклонится в разные стороны от прямой линии, а после диска соединится и попадает в приемный рупор.

Интерференция волн

Направим излучающий рупор на два металлических листа, расположенных рядом друг с другом под углом, чуть меньшим 180° (рис. 2.34). Передвигая приемный рупор вокруг листов, обнаружим последовательное усиление и ослабление мощности принимаемой волны. Как объяснить результаты опыта?

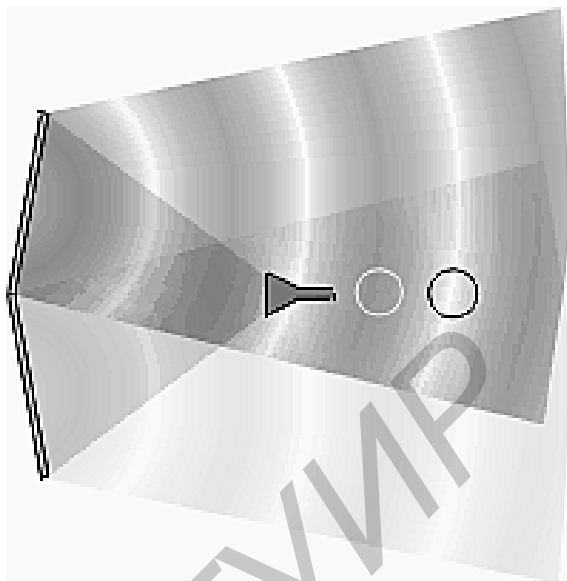


Рис. 2.34

Волна, которая выходит из излучателя, при отражении от листов превратится в две пересекающихся волны.

Эти волны будут накладываться друг на друга, в некоторых областях пространства они усиливают друг друга, а в некоторых – ослабляют. В результате образуются области с колебаниями большой и малой энергии. Причем наблюдается повторение этих областей в пространстве (см. рис. 2.34).

Контрольные вопросы

1. От какой среды исследуют отражение волн?
2. Какое вещество используют для преломления волн?
3. Как расстояние влияет на регистрацию дифрагированной волны?
4. Что происходит в результате интерференции волн?

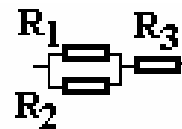
ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

§ 1.8. Закон Ома

1. Два резистора 250 Ом и 500 Ом соединены параллельно. Во сколько раз увеличится сопротивление цепи, если последовательно к ним включить резистор сопротивлением 1000 Ом?

$$\frac{R_{II}}{R_I} = \left(\frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} + R_3 \right) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = 1 + \frac{1000}{250} + \frac{1000}{500} = 7 .$$

2. Участок цепи состоит из трех резисторов сопротивлением $R_1 = 30$ Ом, $R_2 = 20$ Ом, $R_3 = 60$ Ом. Определить силу тока в миллиамперах (мА) во втором резисторе, если падение напряжения на всем участке цепи равно 3,6 В.



$$R_{\text{общ}} = R + R_3 , \quad R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} , \quad U = I_2 \cdot R_2 ,$$

$$U_{\text{общ}} = U + U_3 , \quad U_{\text{общ}} = I_2 \cdot R_2 + \frac{U_{\text{общ}}}{R_{\text{общ}}} \cdot R_3 ,$$

$$I_2 = \frac{U_{\text{общ}}}{R_2 + R_3 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right)} = \frac{3.6}{\left[20 + 60 \cdot \left(\frac{20}{30} + 1 \right) \right] \cdot 10^{-3}} = 30 \text{ мА} .$$

§ 1.9. Закон Джоуля –Ленца

1. Две лампочки на 12 В и мощностью 4 и 6 Вт соответственно соединили последовательно и включили в цепь постоянного напряжения. Во сколько раз мощность первой лампочки при таком включении больше мощности второй?

$$P_1 = \frac{U^2}{R_1}, \quad P_{1\text{посл}} = I^2 \cdot R_1, \quad \frac{P_{1\text{посл}}}{P_{2\text{посл}}} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{6}{4} = 1.5.$$

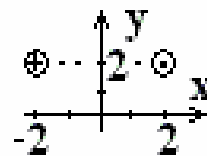
2. Во сколько раз расход электроэнергии при последовательном соединением резисторов 40 , 50 и 10 Ом меньше, чем при параллельным соединением этих же резисторов, если подключение производится к цепи с неизменным напряжением?

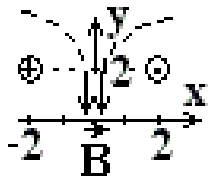
$$P_1 = U^2 \cdot \frac{1}{R_{\text{псл}}}, \quad \frac{P_2}{P_1} = R_{\text{псл}} \cdot \frac{1}{R_{\text{пар}}} = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right),$$

$$\frac{P_2}{P_1} = (40 + 50 + 10) \cdot \left(\frac{1}{40} + \frac{1}{50} + \frac{1}{10} \right) = 14.5.$$

§ 2.2. Сила Ампера и сила Лоренца

1. Определить в точке плоскости с координатами (0,2) модуль индукции результирующего магнитного поля, создаваемого токами, текущими в противоположных направлениях в прямых проводниках бесконечной длины, если модуль индукции поля от любого проводника в этой же точке пространства равен 0,01 Тл.





$$B = B_1 + B_2 = 0.02 \text{ Тл} \quad .$$

2. На линейный проводник с током 1 А со стороны однородного магнитного поля действует сила 6 мН. Определить длину проводника в сантиметрах, если индукция поля равна 0,2 Тл, а проводник расположен под углом 60° к силовым линиям поля.

$$L = \frac{F_A}{I \cdot B \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 0.2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}} = 3.46 \text{ см.}$$

§ 2.5. Электротрансформатор

1. Сила тока в первичной обмотке трансформатора равна 3 А, а ЭДС – 12 В. Сила тока во вторичной обмотке равна 0,15 А, ЭДС – 144 В. Определить в процентах (%) КПД трансформатора. Сопротивлением обмоток пренебречь.

$$n = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

$$\eta = \frac{I_2 \cdot U_2}{I_1 \cdot U_1} \cdot 100\% = \frac{I_2 \cdot \varepsilon_2}{I_1 \cdot \varepsilon_1} \cdot 100\% = \frac{0.15 \cdot 144}{3 \cdot 12} \cdot 100\% = 60\% \quad .$$

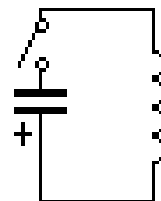
2. Определить КПД трансформатора в процентах (%) при понижении напряжения с 220 до 12,1 В, если коэффициент его трансформации равен Сопротивлением первичной обмотки пренебречь.

$$P_1 = P_2 = I_2 \cdot \varepsilon_2, \quad k = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{I_2}{I_1},$$

$$\eta = \frac{I_2 \cdot U_2}{I_1 \cdot U_1} \cdot 100\% = \frac{k \cdot U_2}{U_1} \cdot 100\% = \frac{7 \cdot 12.1}{220} \cdot 100\% = 38.5\%$$

§ 2.7. Колебательный контур

1. В колебательном контуре, состоящем из первоначально заряженного конденсатора емкостью 0,4 мкФ и катушки, индуктивность которой составляет 1 мГн, замыкают ключ.



Определить через какое время в микросекундах (мкс) произойдет первая разрядка конденсатора? Сопротивлением контура пренебречь.

$$T_1 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C_1}, \quad C_2 = \varepsilon \cdot C_1 = \varepsilon \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad \frac{T_2}{T_1} = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} = \sqrt{4} = 2.$$

2. В колебательном контуре с конденсатором емкостью 2 мкФ резонанс наступает на частоте 300 Гц. Определить емкость конденсатора, который подключили параллельно к первому, если резонансная частота контура уменьшилась на 200 Гц.

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\sqrt{C_1}}{\sqrt{C_1 + C_2}}, \quad C_2 = C_1 \cdot \left[\left(\frac{v_1}{v_1 - \Delta v} \right)^2 - 1 \right] = 2 \cdot \left[\left(\frac{300}{300 - 200} \right)^2 - 1 \right] = 16 \text{ мкФ}.$$

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Глава 1. Электричество | 3 |
| § 1.1. Источники тока | 3 |
| § 1.2. Действия тока | 5 |
| § 1.3. Электрическая цепь | 7 |
| § 1.4. Начальные сведения о силе тока и сопротивлении..... | 9 |
| § 1.5. Сила тока | 11 |
| § 1.6. Напряжение и мощность тока | 13 |
| § 1.7. Работа и мощность тока..... | 15 |
| § 1.8. Закон Ома | 16 |
| § 1.9. Закон Джоуля – Ленца | 18 |
| § 1.10. Электрический ток в вакууме..... | 20 |
| Глава 2. Законы магнитного поля | 24 |
| § 2.1. Магнитное поле прямого тока..... | 24 |
| § 2.2. Сила Ампера и сила Лоренца | 27 |
| § 2.3. Соленоид и электромагнит | 30 |
| § 2.4. Постоянные магниты | 32 |
| § 2.5. Электротрансформатор..... | 35 |
| § 2.6. Катушка индуктивности | 38 |
| § 2.7. Колебательный контур | 39 |
| § 2.8. Как получить электромагнитную волну | 42 |
| § 2.9. Как обнаружить электромагнитную волну..... | 44 |
| § 2.10. Свойства электромагнитных волн | 45 |
| Примеры решения задач | 48 |

Учебное издание

Григорьев Александр Александрович

Э ЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Методическое пособие
для иностранных слушателей
подготовительного отделения

Редактор Н. В. Гриневич

Подписано в печать 15.09.2009.
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 2,6.

Формат 60×84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 3,26.
Заказ 167.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровка, 6