



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

В.В. Борисовский

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК **(теория и практика)**

Учебное пособие
для студентов всех технических направлений
очной и заочной форм обучения

Рубцовск 2014

УДК 530.1

Борисовский В.В. Электрический ток (теория и практика): Учебное пособие для студентов всех технических направлений очной и заочной форм обучения/ Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2014.- 51 с.

Пособие представляет собой краткую теорию процессов прохождения электрического тока через различные среды. Приведенные практические примеры из повседневной жизни, природы и техники помогают раскрыть суть законов и явлений постоянного и переменного токов.

Рассмотрено и одобрено на заседании
НМС Рубцовского индустриального
института
Протокол № 9 от 25.12.2014г.

Рецензент:

к.т.н., доцент Г.В. Плеханов

© Рубцовский индустриальный институт, 2014

Содержание

Введение	4
I. Постоянный ток	6
1.1. Сторонние силы. Напряженность и ЭДС	6
1.2. Сила и плотность тока	7
1.3. Закон Ома для постоянного тока	8
1.4. Работа и мощность электрического тока	10
II. Переменный ток	11
2.1. Генерирование переменного тока	11
2.2. Резистор, конденсатор и индуктивность в цепи переменного тока	12
2.3. Закон Ома для цепи переменного тока	13
2.4. Действующие значения тока и напряжения	14
2.5. Трансформатор	15
III. Вопросы и задачи	18
IV. Подсказки	30
V. Ответы	33

Введение

До 1800 года изучение электрических явлений основывалось главным образом на получении с помощью трения статического заряда. В предшествующее столетие были построены машины, позволяющие достичь таким способом довольно высоких потенциалов и накапливать очень сильные заряды, но практического значения они не имели.

Наконец, в 1800 году произошло событие огромного практического значения. Итальянский физик, химик и физиолог Алессандро Вольта (1745-1827) изобрел электрическую батарею (вольтов столб) и впервые получил с ее помощью устойчивый поток электрических зарядов, то есть получил постоянный электрический ток. Это открытие ознаменовало начало новой эпохи, полностью преобразившей нашу цивилизацию; вся современная электродинамика и электротехника основана на использовании электрического тока.

В электродинамике рассматриваются явления и процессы, обусловленные движением электрических зарядов или микроскопических заряженных тел. В этом разделе учения об электричестве важнейшим понятием является понятие об электрическом токе. Под *электрическим током*, или просто *током*, обычно понимают направленное движение электрических зарядов. Различают два вида тока – ток проводимости и конвекционный ток. *Ток проводимости* – это направленное движение всех зарядов в проводящих телах и средах: электроны в металлах, электроны и дырки в полупроводниках, ионы в электролитах, ионы и электроны в газах. *Конвекционный ток* – это движение заряженных тел и поток электронов или других заряженных частиц в вакууме.

Для возникновения и существования электрического тока необходимо, с одной стороны, наличие свободных носителей тока – заряженных частиц, способных перемещаться упорядоченно, а с другой – наличие электрического поля, энергия которого, каким-то образом восполняясь, расходовалась бы на их упорядоченное движение. Восполнение энергии происходит в батареях, электрических генераторах и других устройствах, преобразующих различные виды энергии (химическую, механическую, световую и т.п.) в электрическую энергию. Эти устройства называют *источниками ЭДС (электродвижущей силы)*. За направление тока условно принимают направление движения положительных зарядов.

Электрический ток, проходящий через данную поверхность, характеризуется силой тока. Сила тока является скалярной величиной, определяемой электрическим зарядом Δq , переносимым через площадку S в единицу времени Δt :

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (1)$$

В Международной системе единиц (СИ) единица силы тока является основной и носит название *ампер (А)*.

Если за равные промежутки времени через любое сечение проводника проходит одинаковый заряд, то такой ток называется постоянным. Сила тока в любой момент времени пропорциональна ЭДС источника, поэтому для получения постоянного тока необходимо иметь источники тока, у которых ЭДС также

постоянна. Такими источниками являются гальванические элементы, электрические аккумуляторы, термогенераторы, генераторы постоянного тока и солнечные батареи. Постоянный ток используется в различных отраслях промышленности, например, в электрометаллургии, на транспорте (тяговые электродвигатели), для питания устройств связи, автоматики и телемеханики, сигнализации и т.п.

Однако в современной технике широко применяются не только источники постоянного тока, но и различные генераторы электрического тока, в которых ЭДС периодически изменяется. С помощью таких генераторов получают переменный электрический ток, периодически изменяющийся по силе и направлению. В широком смысле переменный ток – всякий ток, изменяющийся во времени. Важность переменного тока объясняется тем, что его легко передавать к потребителю вследствие относительной простоты преобразования (трансформации, выпрямления, изменения частоты). Кроме того, большое число генераторов переменного тока, вырабатывающих синусоидальное напряжение, производят основную часть всей энергии в мире. В энергетике России и европейских стран используется одно- и трехфазный синусоидальный переменный ток стандартной частоты 50 Гц, в США – 60 Гц. Переменный ток обеспечивает работу электрических двигателей в станках различных предприятий и в быту, приводит в действие осветительные приборы в наших квартирах и на улице, холодильники и пылесосы, отопительные приборы и т.п. Переменный ток более высокой частоты, чем стандартная, применяется в радиотехнике, электроавтоматике и др.

I. Постоянный ток

1.1. Стороннее поле. Напряжение и ЭДС

Электрическим током называется упорядоченное (или направленное) движение электрических зарядов. В проводящих средах свободные заряды движутся хаотически, но в присутствии электрического поля на хаотическое движение накладывается упорядоченное. В электрическом поле под действием электрических (кулоновских) сил $F_{\text{кул}}$ положительные заряды q двигаются вдоль силовых линий поля, отрицательные заряды q против линий поля. Поле этих сил называется кулоновским или электростатическим, напряженность этого поля равна

$$E = \frac{F_{\text{кул}}}{q}. \quad (2)$$

Кроме того, на электрические заряды могут действовать и неэлектрические силы, так называемые сторонние силы. Упорядоченное движение электрических зарядов может возникать за счет химических реакций в источнике тока, за счет переменного магнитного поля. И хотя в этом случае нет прямого действия каких-либо сил на свободные заряды, явление протекает так, как будто на заряды действует некоторое стороннее поле, которое характеризуется напряженностью

$$E_{\text{ст}} = \frac{F_{\text{ст}}}{q}. \quad (3)$$

Энергетической характеристикой кулоновского поля служит потенциал φ . Разность потенциалов равна отношению работы, которую совершают кулоновские силы при перемещении некоторого заряда q , к величине этого заряда:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{\text{кул}}}{q}. \quad (4)$$

Если при перемещении заряда работа совершается не только кулоновскими, но и сторонними силами, то полная работа

$$A = A_{\text{кул}} + A_{\text{ст}}, \quad (5)$$

где $A_{\text{кул}}$ – работа кулоновских сил, $A_{\text{ст}}$ – работа, совершаемая за счет действия неэлектрических источников энергии – например, магнитными силами или за счет изменения внутренней энергии при диффузии заряженных частиц, или за счет изменения внутренней энергии веществ, вступающих в химическую реакцию, или за счет энергии света (фотоэффект), или за счет тепла (термо-ЭДС).

Поделив левую и правую части равенства (5) на величину перемещаемого заряда, получим:

$$\frac{A}{q} = \frac{A_{\text{кул}}}{q} + \frac{A_{\text{ст}}}{q}, \quad (6)$$

где $\frac{A}{q} = U$ – **напряжение** на данном участке цепи, $\frac{A_{\text{ст}}}{q} = \mathcal{E}$ – **электродвижущая сила** (или, сокращенно, ЭДС) на данном участке, $\frac{A_{\text{кул}}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2$. Тогда

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}, \quad (7)$$

то есть напряжение на участке цепи равно сумме разности потенциалов и электродвижущей силы на данном участке.

Если на участке цепи не действуют сторонние силы, то ЭДС равна нулю и такой участок называют *однородным*, а напряжение на нем равно разности потенциалов:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (8)$$

Для замкнутой цепи напряжение равно алгебраической сумме ЭДС, так как $\varphi_1 = \varphi_2$, то есть

$$U = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i. \quad (9)$$

1.2. Сила и плотность тока

Количественной характеристикой электрического тока является *сила тока*, определяемая зарядом, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$. Сила тока зависит от скорости упорядоченного движения свободных зарядов, концентрации зарядов и сечения проводника. Если концентрация свободных зарядов равна $n = \frac{\Delta N}{\Delta V}$, где ΔN – число зарядов в объеме проводника ΔV , электрический заряд одного свободного носителя тока равен e и средняя скорость его движения равна v , то за время Δt через сечение S переносится заряд $\Delta q = e\Delta N = enSv\Delta t$. Тогда сила тока

$$I = enSv. \quad (10)$$

Распределение электрического тока по сечению проводника характеризуется плотностью тока, которая определяется формулой:

$$J = \frac{I}{S_{\perp}} = env. \quad (11)$$

Плотность тока j – векторная величина, измеряемая в А/м^2 .

Средняя скорость упорядоченного движения электронов проводимости в металлах небольшая, она составляет всего несколько миллиметров в секунду. Действительно, если концентрация свободных электронов должна примерно совпадать с концентрацией атомов, $n=10^{28}\text{-}10^{29} \text{ м}^{-3}$, наибольшая плотность тока в металлических проводниках составляет около 10^7 А/м^2 и заряд $e=1,6\cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, то

$$v = \frac{j}{en} = \frac{10^7}{1,6\cdot 10^{-19}\cdot 10^{28}} \approx 6 \text{ мм/с.}$$

Столь малая скорость, казалось бы, противоречит тому, что при включении электрической цепи ток в ней устанавливается практически мгновенно. Однако ничего удивительного в этом нет. Дело в том, что электрическое поле, создаваемое источником тока, возникает практически одновременно во всей цепи, так как распространяется по поверхности проводника со скоростью света $c=3\cdot 10^8 \text{ м/с}$.

1.3. Закон Ома для постоянного тока

Электрический ток в цепи возникает при наличии разности потенциалов. Если имеется однородный участок цепи – им может быть кусок однородного металла постоянного сечения, все точки которого имеют одинаковую температуру, на концах этого участка поддерживается неизменная разность потенциалов $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, то, как установил немецкий физик Георг Ом (1787-1854), в металлическом проводнике сила тока пропорциональна разности потенциалов:

$$I = G\Delta\varphi = \frac{\Delta\varphi}{R} = \frac{U}{R}, \quad (12)$$

где G – электропроводность, $R = \frac{1}{G}$ – электрическое сопротивление, $U = \Delta\varphi$ – напряжение.

Сопротивление металлического проводника пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади его поперечного сечения S :

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (13)$$

где ρ – *удельное сопротивление*. Величина, обратная удельному сопротивлению $\sigma = \frac{1}{\rho}$, называется *удельной электропроводностью*. Проводник, сопротивление которого определяется выражением (13), иногда называют резистором. Сопротивление измеряется в омах (Ом), а удельное сопротивление в Ом·м.

В довольно широком интервале температур, далеких от абсолютного нуля, удельное сопротивление металлических проводников является линейной функцией температуры

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) \approx \rho_0 \alpha T, \quad (14)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление при 0°C , T – температура по шкале Кельвина, t – температура по шкале Цельсия.

Если выражение для закона Ома преобразовать, выразив силу тока через плотность тока, сопротивление – через длину, сечение и удельное сопротивление, а разность потенциалов – через напряженность поля, то после сокращения получим:

$$j = \frac{E}{\rho} = \sigma E. \quad (15)$$

Это выражение носит название закон Ома в дифференциальной форме для участка цепи.

Для неоднородного участка цепи закон Ома будет иметь вид:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}}{R}. \quad (16)$$

При этом следует обратить внимание на знак ЭДС. Если направление вектора напряженности стороннего поля совпадает с направлением вектора напряженности кулоновского поля, то ЭДС и разность потенциалов имеют одинаковый знак, в противном случае их знаки противоположны.

Если имеем замкнутую цепь, состоящую из источника тока и сопротивления, то это тоже неоднородный участок цепи, у которого начальная и конечная точки цепи совпадают и разность потенциалов между ними равна нулю. Тогда

из формулы (16), выражающей закон Ома для неоднородного участка цепи, получим, что сила тока в полной (замкнутой) цепи равна

$$I = \frac{\varepsilon}{R_0},$$

где ε - ЭДС источника тока, R_0 - сопротивление цепи. Это сопротивление состоит из сопротивления R резисторов, входящих во внешнюю часть цепи и внутреннего сопротивления r источника тока, и тогда закон Ома для полной цепи имеет вид:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}. \quad (17)$$

Следовательно, **сила тока в полной цепи равна электродвижущей силе источника, деленной на сумму сопротивлений внешней и внутренней частей цепи.**

Полная электрическая цепь состоит из источника тока и внешней цепи. Во внешнюю цепь входят потребители тока (электрические лампы, нагревательные приборы, электродвигатели и т.д.), соединительные провода и выключатели. В нее могут входить также приборы, регулирующие и контролирующие силу тока и напряжение в цепи.

Сопротивление внешней цепи, от которого зависит сила тока во всей цепи (закон Ома), - это общее сопротивление всех элементов внешней цепи, соединенных между собой тем или иным способом.

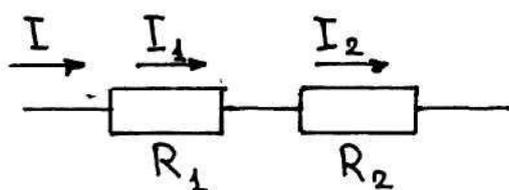


Рис. 1

Проводники могут быть соединены последовательно или параллельно. При последовательном соединении конец предыдущего сопротивления соединен с началом последующего (рис.1) и сила тока во всех проводниках одинакова. И это очевидно, в противном случае заряды накапливались бы в каких-то точках цепи.

Следовательно, $I=I_1=I_2$. Полное напряжение на концах всех проводников, включенных в цепь (в нашем случае два проводника), равна сумме напряжений на концах каждого из включенных проводников $U=U_1+U_2=IR_1+IR_2$. Обозначив сопротивление всего соединения через R , получим $U=IR=I(R_1+R_2)$. Отсюда $R=R_1+R_2$.

Таким образом, общее сопротивление цепи, состоящей из нескольких последовательно соединенных проводников, равно сумме сопротивлений отдельных проводников.

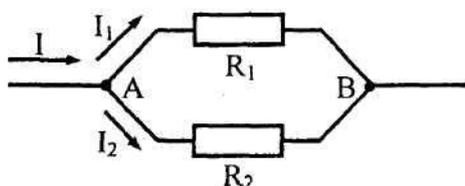


Рис. 2.

При параллельном соединении проводников (рис.2), при котором все начала проводников соединены в один узел, а все концы в другой, напряжение на всех проводниках одинаково, так как они присоединены к одним и тем же точкам цепи (A и B), и равно напряжению U на всей цепи: $U=U_1=U_2$. Очевидно также, что $I=I_1+I_2$, иначе заряды где-то скапливались бы.

Обозначим полное сопротивление всей разветвленной цепи (между точками A и B) через R , а сопротивление каждого проводника на этом участке че-

рез R_1 и R_2 . Из закона Ома следует, что $I = \frac{U}{R}$, $I_1 = \frac{U}{R_1}$ и $I_2 = \frac{U}{R_2}$, и тогда $\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$. Сокращая на U , находим

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \text{ или } G = G_1 + G_2,$$

где G , G_1 и G_2 – проводимости всего соединения и каждого из проводников в отдельности.

1.4. Работа и мощность электрического тока

При прохождении электрического тока по проводнику происходит перенос зарядов от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом. Если на концах некоторого проводника имеется напряжение U , равное разности потенциалов, то при силе тока I через поперечное сечение проводника за время t переносится заряд $q=It$. В этом случае работа перемещения заряда q по проводнику равна

$$A = qU = IUt. \quad (18)$$

Эта работа и определяет работу электрического тока в проводнике. Полученную формулу можно преобразовать, используя закон Ома, к другому виду:

$$A = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t.$$

Формулой $A = I^2 R t$ удобно пользоваться при последовательном соединении, так как в этом случае сила тока во всех проводниках одинакова. При параллельном соединении удобнее пользоваться формулой $A = \frac{U^2}{R} t$, так как напряжение в проводниках одно и то же.

Любой электрический прибор рассчитан на потребление определенной энергии в единицу времени. Поэтому наряду с работой тока очень важное значение имеет мощность тока. Мощность тока – это работа тока за единицу времени:

$$P = \frac{A}{t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (19)$$

Проводник, по которому проходит электрический ток, нагревается, так как заряды, движущиеся по проводнику, обладают определенным запасом кинетической энергии и при столкновении с частицами, не участвующими в движении, свободные заряды отдают им свою энергию. В результате внутренняя энергия тела повышается, то есть повышается его температура.

В случае, если ток в проводнике не сопровождается механическими или химическими действиями, а проходит только нагревание проводника, то на основании закона сохранения энергии можно утверждать, что выделяющееся в проводнике количество теплоты равно работе тока:

$$Q = A = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t. \quad (20)$$

Эту формулу на основании опытов впервые получили независимо друг от друга английский ученый Джеймс Джоуль (1818-1889) и русский ученый Эмилий Ленц (1804-1865). Сформулированный ими вывод носит название закона Джоуля-Ленца.

II. Переменный ток

Всякий электрический ток, изменяющийся во времени по силе и направлению, является переменным током. Наибольшее распространение получил периодически изменяющийся переменный ток; он меняет направление много раз в секунду и обычно является синусоидальным. Почти повсеместно в жилые дома и на предприятия поступает переменный синусоидальный ток с частотой колебаний 50 Гц (в США и Канаде – 60 Гц).

2.1. Генерирование переменного тока

Генерирование (получение) переменного тока в основном происходит в результате преобразования механической энергии в электрическую; при этом для получения переменной ЭДС используется явление электромагнитной индукции, открытое в 1831 году английским физиком Майклом Фарадеем (1791-1867). Электромагнитная индукция – это явление возникновения электродвижущей силы в проводнике, движущемся в магнитном поле или в замкнутом проводящем контуре, вследствие движения контура в магнитном поле или изменения самого поля. Основным законом электромагнитной индукции является закон Фарадея, согласно которому ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad (21)$$

где $\Delta\Phi$ – изменение магнитного потока $\Phi = BS\cos\alpha$ за промежуток времени Δt , B – индукция магнитного поля, S – площадь контура, α – угол между вектором индукции B и нормалью n (перпендикуляром к площади контура S).

Получение переменного синусоидального тока осуществляется с помощью устройства, которое носит название генератор переменного тока. Упрощенная схема генератора представляет собой замкнутый виток провода, который помещен в однородное магнитное поле (рис.3). При вращении витка, охватывающего площадь S механическим способом с угловой скоростью ω , в нем возникает ЭДС индукции, так как меняется магнитный поток, пронизывающий виток, при изменении угла

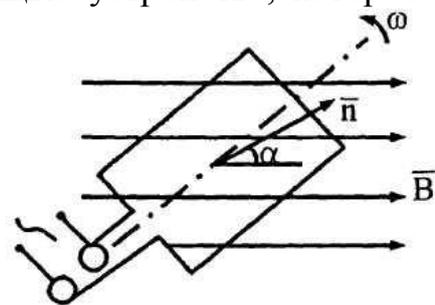


Рис. 3.

$\alpha = \omega t$. Если магнитный поток, пронизывающий замкнутый виток, $\Phi = BS\cos\omega t$, то согласно закону Фарадея величина ЭДС индукции равна:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d BS\cos\omega t}{dt} = BS\omega\sin\omega t.$$

Для вращающейся катушки, которая содержит N витков,

$$\mathcal{E}_i = NBS\omega\sin\omega t = \mathcal{E}_0\sin\omega t. \quad (22)$$

Таким образом, на выходе генератора ЭДС изменяется со временем по синусоидальному закону с амплитудой $\mathcal{E}_0 = NSB\omega$. Принцип действия генератора переменного тока основан на вращении катушки в магнитном поле.

2.2. Резистор, конденсатор и индуктивность в цепи переменного тока

а) Если к источнику переменной ЭДС подключен только резистор, сопротивление которого равно R , то сила тока через резистор будет изменяться в соответствии с изменением ЭДС:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\varepsilon}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t, \quad (23)$$

где U – напряжение на резисторе, $I_0 = \frac{\varepsilon_0}{R}$ – амплитудное значение силы тока.

Таким образом, при наличии в цепи только резистора (активное сопротивление) напряжение и сила тока совпадают по фазе.

б) Когда конденсатор емкостью C непосредственно подключается к источнику постоянного тока, его обкладки быстро приобретают одинаковый по величине и противоположный по знаку заряд, но постоянный ток не течет через конденсатор. Если же конденсатор подключен к источнику переменной ЭДС, то через конденсатор непрерывно течет переменный ток, поскольку при включении напряжения переменного тока происходит перетекание заряда, так что одна обкладка заряжается отрицательно, а другая – положительно. Однако не успевает конденсатор полностью зарядиться, как полярность напряжения изменяется и заряды начинают двигаться в противоположном направлении. Поэтому переменный ток в цепи течет непрерывно, пока к конденсатору приложено переменное напряжение.

Рассмотрим этот процесс более детально при условии, что индуктивность и резистор в цепи отсутствуют. Тогда ЭДС источника в любой момент равна напряжению на обкладках конденсатора $U = \frac{q}{C}$, где q – заряд конденсатора в этот момент, то есть

$$U = \frac{q}{C} = \varepsilon_0 \sin \omega t. \quad (24)$$

Заряд q на обкладках совпадает по фазе с напряжением, а сила тока в любой момент на конденсаторе равна

$$I = \frac{dq}{dt} = \omega C \varepsilon_0 \cos \omega t, \text{ или} \\ I = I_0 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}), \quad (25)$$

где $I_0 = \omega C \varepsilon_0$ – амплитудное значение силы тока.

Из формул (24), (25) видно, что сила тока I и напряжение U **не совпадают по фазе: сила тока опережает напряжение на $\frac{\pi}{2}$ радиан.**

Амплитудные значения силы тока и напряжения взаимосвязаны между собой соотношением:

$$I_0 = \omega C \varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_0}{X_c},$$

где $X_c = \frac{1}{\omega C}$ – реактивное емкостное сопротивление. Конденсатор в цепи переменного тока, подобно резистору, затрудняет перетекание заряда, так как на его обкладках накапливается заряд. Зависимость емкостного сопротивления от емкости конденсатора и от частоты с физической точки зрения естественна: чем больше емкость C , тем больший заряд может накопиться на конденсаторе и

тем меньше его противодействие перемещению заряда в цепи. Чем выше частота, тем короче время накопления заряда на обкладках и тем меньшее количество заряда, препятствующее его перемещению, успевает накопиться.

в) Если подключить катушку с индуктивностью L к источнику переменной ЭДС (емкостью катушки и ее сопротивлением пренебрегаем), то ЭДС источника будет равна ЭДС самоиндукции, возбуждаемой в катушке переменным током $I = I_0 \sin \omega t$. Тогда если ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}$, то напряжение $\mathcal{E} = -\mathcal{E}_s = L \frac{dI}{dt} = \omega L I_0 \cos \omega t = \omega L I_0 \sin(\omega t + \pi/2)$. Следовательно, в цепи с индуктивностью L **сила тока отстает по фазе от напряжения на $\pi/2$ радиан**.

Амплитудное значение напряжения равно $\mathcal{E}_0 = \omega L I_0$, или $\mathcal{E}_0 = X_L I$, где $X_L = \omega L$ – реактивное индуктивное сопротивление.

2.3. Закон Ома для цепи переменного тока

Рассмотрим цепь переменного тока, содержащую последовательно соединенные все три элемента: резистор с сопротивлением R , катушку индуктивностью L и конденсатор емкостью C (рис.4). В данной

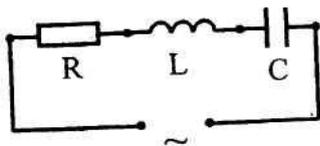


Рис. 4

цепи действуют три переменных электрических поля. Прежде всего, это поле, созданное внешним источником – генератором; оно характеризуется ЭДС $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$. Затем действует поле самоиндукции, которое характеризуется ЭДС $\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}$. Наконец, действует поле зарядов, скапливающихся на пластинах конденсатора; оно характеризуется разностью потенциалов. Тогда для неоднородного участка цепи имеем:

$$IR = \mathcal{E} + \mathcal{E}_s + (\varphi_2 - \varphi_1). \quad (26)$$

Выражение (26) можно представить в виде

$$\mathcal{E} = IR + \varphi_1 - \varphi_2 - \mathcal{E}_s = U_R + U_L + U_C,$$

где $U_R = IR$ – напряжение на активном сопротивлении, $U_C = \varphi_1 - \varphi_2 = q/C$ – напряжение на емкостном сопротивлении и $U_L = -\mathcal{E}_s = L \frac{dI}{dt}$ – напряжение на индуктивном сопротивлении.

Для полной цепи переменного тока (рис.4) сила тока во всех трех последовательно соединенных сопротивлениях одна и та же $I = I_0 \sin \omega t$, а напряжения на всех трех сопротивлениях имеют вид:

$$\begin{aligned} U_R &= IR = I_0 R \sin \omega t, \\ U_C &= I_0 X_C \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \\ U_L &= I_0 X_L \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \end{aligned}$$

ЭДС $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin(\omega t + \varphi)$ есть сумма напряжений U_R , U_L и U_C , а так как они отличаются по фазе, то для их сложения удобно воспользоваться векторной диаграммой (рис.5) напряжений. Воспользовавшись теоремой Пифагора, получим:

$$\varepsilon_0 = \sqrt{I_0^2 R^2 + I_0^2 (X_L - X_C)^2} = I_0 \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{\omega C})^2}. \quad (27)$$

Соответственно, амплитуда колебаний тока равна

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{\omega C})^2}} = \frac{\varepsilon_0}{Z}, \quad (28)$$

где величина $Z = \sqrt{R^2 + (L\omega - \frac{1}{\omega C})^2}$ называется **полным сопротивлением** цепи переменного тока, а выражение $I_0 = \frac{\varepsilon_0}{Z}$ называется **законом Ома для цепи переменного тока**.

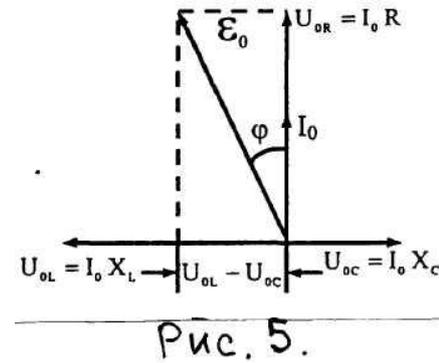


Рис. 5.

Сдвиг фаз между колебаниями тока и ЭДС, как следует из векторной диаграммы (рис.5), определяется по формуле:

$$\cos \varphi = \frac{I_0 R}{\varepsilon_0} = \frac{R}{Z}. \quad (29)$$

2.4. Действующие значения тока и напряжения

В цепи с активным сопротивлением происходит необратимое преобразование энергии электрического тока во внутреннюю энергию проводника, т.е. происходит выделение джоулева тепла. Мгновенная мощность равна произведению мгновенных значений тока и ЭДС:

$$p = I\varepsilon = I_0^2 R \sin^2 \omega t.$$

График этой функции изображен на рис.6 сплошной линией. Для сравнения пунктиром показан график изменения силы тока. Амплитуда мощности $P_0 = I_0^2 R$.

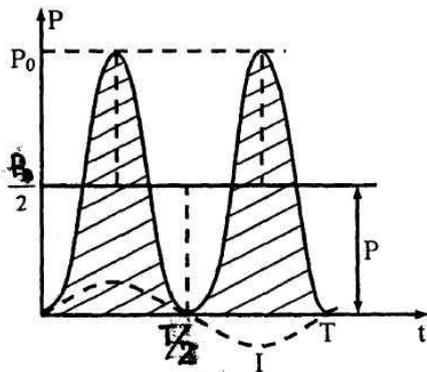


Рис. 6

Вычислим среднюю мощность переменного тока за время, равное периоду колебаний тока. Для этого необходимо работу, совершенную током за это время (выделившееся за это время джоулево тепло), разделить на период. Для вычисления работы воспользуемся графиком на рис.6. Элементарная работа за малый промежуток времени Δt равна произведению мгновенной мощности в этот промежуток времени на ширину промежутка $\Delta A = p \Delta t$; полная работа будет изображаться площадью под графиком. Как видно из

графика, заштрихованная площадь под кривой равна площади прямоугольника, основание которого равно периоду, а высота – половине амплитуды мощности. Тогда работа за период:

$$A = \frac{1}{2} P_0 T = \frac{1}{2} I_0^2 R T,$$

а средняя мощность

$$P = \frac{A}{T} = \frac{1}{2} I_0^2 R.$$

Сравнив это выражение с формулой для вычисления мощности постоянного тока $P = I_g^2 R$, получим $I_g^2 R = \frac{I_0^2}{2} R$. Отсюда следует, что $I_g = \frac{I_0}{2}$. Следовательно, переменный ток с амплитудой тока I_0 по своему тепловому (или механическому) действию эквивалентен постоянному току с силой тока $I_g = \frac{I_0}{2}$. Эта величина называется действующим (или эффективным) значением переменного тока. Соответственно, величины $\mathcal{E}_g = \frac{\mathcal{E}_0}{2}$ и $U_g = \frac{U_0}{2}$ называются действующими значениями ЭДС и напряжения.

В полной цепи переменного тока необходимые преобразования энергии происходят только на активном сопротивлении R , в то время как величину амплитуды тока ограничивает полное сопротивление Z . Для вычисления активной мощности воспользуемся уравнением $P = \frac{1}{2} I_0^2 R$. Подставив $I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{Z}$, получим

$$P = \frac{1}{2} I_0 \frac{\mathcal{E}_0}{Z} = \frac{I_0}{2} \cdot \frac{\mathcal{E}_0}{2} \cdot \frac{R}{Z} = I_g \cdot \mathcal{E}_g \cdot \cos\varphi. \quad (30)$$

Множитель $\frac{R}{Z} = \cos\varphi$ называется коэффициентом мощности. Он играет важную роль в электротехнике. Если в цепи имеется значительный сдвиг по фазе между колебаниями тока и ЭДС, то коэффициент мощности будет малым и нагрузка потребует от генератора малую активную мощность, хотя генератор вырабатывает полную мощность, равную $P_{\text{полн}} = I_g \cdot \mathcal{E}_g$. Таким образом, при низком коэффициенте мощности нагрузка потребляет лишь часть энергии, которую вырабатывает генератор. Оставшаяся часть энергии перекачивается периодически от генератора к потребителю и обратно, рассеивается в линиях электропередачи и расходуется на создание электрических и магнитных полей.

Максимум энергии от генератора потребляет система, для которой коэффициент мощности $\cos\varphi = 1$. Так как $\cos\varphi = \frac{R}{Z}$, а $Z = \sqrt{R^2 + L\omega - \frac{1}{\omega C}}^2$, то $\cos\varphi = 1$ в том случае, когда $L\omega - \frac{1}{\omega C} = 0$ или $L\omega = \frac{1}{\omega C}$. Таким образом, при равенстве индуктивного сопротивления $X_L = \omega L$ и емкостного сопротивления $X_C = \frac{1}{\omega C}$ $\cos\varphi$ будет равен 1; такую ситуацию, возникающую в полной цепи переменного тока, называют резонансом тока. В этом случае амплитуда тока $I_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{Z}$ имеет максимальное значение.

2.5. Трансформатор

Нередко требуется от одного и того же источника переменного тока питать приборы, рассчитанные на разные напряжения. Повышение и понижение напряжения переменного тока довольно просто осуществить при помощи трансформатора.

Трансформатор – это устройство для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты. Пробразом современного трансформатора является устройство, которое в 1878 году стал применять русский ученый и изобретатель П.Н. Яблочков (1847-1894)

для питания изобретенных им «электрических свечей». Это устройство представляло собой две проволочные катушки, расположенные одна в другой. В 1882 г. И.Ф. Усагин (1855-1919) – физик-самоучка, применил трансформатор, похожий на современный, для освещения на Всероссийской промышленно-художественной выставке в Москве.

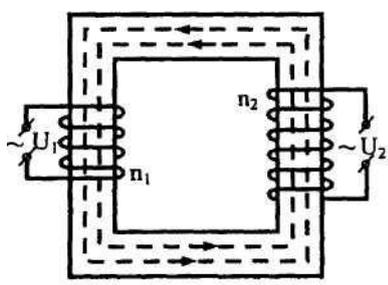


Рис. 7.

Трансформатор состоит из замкнутого стального сердечника магнитопровода, на котором располагаются две или несколько обмоток, не имеющих между собой электрического контакта (рис.7). В основе работы трансформатора лежит явление электромагнитной индукции. На сердечнике помещены две обмотки: первичная с числом витков n_1 и вторичная – с числом витков n_2 . Обмотки обладают незначительным сопротивлением и большой индуктивностью.

Пусть к концам первичной обмотки приложено переменное напряжение U_1 (от сети или генератора). По обмотке пойдет переменный ток, который намагнитит сталь сердечника, создав в нем переменный магнитный поток. Этот поток, возникающий в сердечнике трансформатора, пронизывает витки первичной и вторичной обмоток, возбуждая в каждом витке обмотки одну и ту же ЭДС $\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Таким образом, в цепи первичной обмотки трансформатора будет действовать напряжение U_1 и ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_1 = n_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. При этом напряжение U_1 больше \mathcal{E}_1 на величину падения напряжения в обмотке, которое очень мало. Следовательно, приближенно можно считать, что $U_1 = \mathcal{E}_1$, то есть $U_1 = n_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Переменный магнитный поток, возникающий в сердечнике трансформатора, возникает и во вторичной обмотке с числом витков n_2 , ЭДС $\mathcal{E}_2 = n_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, которая равна напряжению U_2 на концах разомкнутой вторичной обмотки $U_2 = \mathcal{E}_2$. Следовательно, $U_1 = n_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ и $U_2 = n_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Разделив U_1 на U_2 , получим:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} = k. \quad (31)$$

Постоянная величина k для данного трансформатора называется коэффициентом трансформации. Если нужно повысить напряжение, вторичная обмотка выполняется с большим числом витков; если же нужно понизить напряжение, вторичную обмотку берут с меньшим числом витков, и в этом случае трансформатор работает как понижающий.

Пока вторичная обмотка разомкнута (тока нет), трансформатор работает вхолостую. При холостом ходе он потребляет небольшую энергию, так как ток, намагничивающий стальной стержень, вследствие большой индуктивности катушки, очень мал. Передача энергии из первичной цепи во вторичную при холостом ходе отсутствует. Трансформатор потребляет небольшую мощность на перемагничивание сердечника. Это потери на гистерезис, называемые «потерями в стали», $P_{ст}$.

При замыкании вторичной обмотки на активную нагрузку в этой обмотке возникает ток, действующее значение которого обозначим через I_2 ; напряжение на зажимах обмотки станет равно U_2 . По закону Ленца ток во вторичной обмотке противодействует изменению магнитного потока в сердечнике. В результате этого индуктивное сопротивление первичной обмотки уменьшится, а ток в ней возрастает. Действующее значение тока в первичной обмотке нагруженного трансформатора больше тока холостого хода: $I_1 > I_{xx}$.

По закону сохранения энергии мощность на вторичной обмотке при работе трансформатора равна $P_2 = P_1 - P_{\text{медь}} - P_{\text{ст}}$, где P_1 – мощность, потребляемая из сети первичной обмоткой; $P_{\text{медь}}$ – «потери в меди», мощность потерь на джоулевое тепло в обмотках, которые сделаны из медной проволоки; $P_{\text{ст}}$ – «потери в стали». И тогда КПД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{медь}} + P_{\text{ст}}}.$$

У трансформатора большой мощности КПД достигает 98-99%.

При нагрузках, близких к номинальной, потери мощности в трансформаторе малы, и приближенно можно считать, что $P_1 \approx P_2$. Поэтому $I_1 U_1 = I_2 U_2$ и отсюда следует, что

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{1}{k},$$

то есть силы тока в обмотках трансформатора приближенно обратно пропорциональны числу витков в обмотках.

Следует заметить, что так как соотношение $\frac{U_1}{U_2} \approx k$ выполняется в широком диапазоне нагрузок, то соотношение $\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{k}$ удовлетворительно выполняется лишь при номинальных нагрузках.

III. Вопросы и задачи

1. **Почему по проводнику не идет ток?** В электрическом поле потенциал точки А выше потенциала точки В. Однако если поместить в это поле проводник между этими точками, ток по проводнику идти не будет. Почему?

2. **Пора зажечь свет.** Электрическим током называют упорядоченное (или направленное) движение электрических зарядов. В металлах носителями электрического тока являются свободно перемещающиеся электроны. Электроны движутся по цепи с относительно небольшой скоростью (порядка 0,1 мм/с). Возникает вопрос: почему так быстро загорается лампочка после поворота выключателя, ведь скорость движения электронов так мала? Сколько времени проходит между моментом поворота выключателя и моментом загорания лампочки? Потребуется ли какое-то время, чтобы электроны по проводам «добрались» до лампочки? Через какое время, после того, как в цепи пошел ток, лампочка начинает светиться?

3. **Поражение электрическим током.** Что происходит с человеком, когда он прикасается к проводу, который находится под напряжением? Что поражает его или даже может убить – ток или напряжение? Или то и другое? Получает ли он ожог? Нарушается ли у него сердечный ритм? Как степень опасности зависит от частоты? Действительно ли постоянный ток опаснее переменного или это зависит от обстоятельств?

И, наконец, еще один вопрос. Если человек, прикоснувшись к токонесящему проводу, будет долго его держать, то это приведет в конце концов к летальному исходу, так как сопротивление тела человека со временем будет уменьшаться и величина тока будет приближаться к критическому значению. Почему сопротивление тела меняется со временем?

4. **«Прилипание» к электрическому проводу.** Если вы случайно схватились за оголенный электрический провод так, что через вашу руку пройдет ток порядка 25 мА, то не исключено, что вы будете не в силах оторвать руку от провода. Почему? Только не пытайтесь проверить это на себе нарочно – это опасно.

5. **Пережившие удары молнии.** Известно много случаев, когда молния поражала людей со смертельным исходом. Но немало людей, которые после удара молнии сумели выжить и даже остаться совершенно невредимыми. Бывали случаи, когда в результате удара молнии дыхание человека останавливалось почти на 20 минут, но затем он полностью приходил в себя – у него не обнаруживалось никаких остаточных повреждений мозга из-за кислородного голодания или электрического шока. Некоторые ученые считают, что во время такого шока потребность мозга в кислороде уменьшается. Однако разве пораженный молнией человек не должен получить ожоги и разве сердце его не останавливается? Как велика энергия, которая воздействует на человека, ставшего жертвой молнии?

6. **Лягушачьи лапки (опыты Гальвани).** В своих знаменитых опытах по исследованию природы нервных и мышечных волокон, проведенных в 80-х годах XVIII века, итальянский физик и физиолог Луиджи Гальвани (1737-1798) в



Рис. 8 .

одной из работ использовал поразительно простое устройство. На бронзовую перекладину, прикрепленную к железному кронштейну, подвешивалась лапка лягушки так, что она касалась основания кронштейна (рис.8), и всякий раз, как это касание происходило, лапка сокращалась, судорожно подергивалась и касание прекращалось. После того, как подергивания прекращались, лапка вытягивалась и опять касалась основания кронштейна, и вновь начинались сокращения и их подергивания. Что вызвало такую реакцию лапки? Почему происходит сокращение мышцы?

7. Электрический угорь и скат. Сегодня общеизвестно, что все позвоночные вследствие нервной деятельности вырабатывают токи низкой частоты, что без этих биотоков было бы невозможно получить кардиограммы и энцефалограммы, невозможно было бы объяснить распространение нервного возбуждения, отсутствовала бы научная база для объяснения парапсихологических явлений.

Однако имеется группа животных, у которых электрические явления проявляются с поразительной силой; они представляют собой настоящие мощные конденсаторы, накапливающие электрические заряды, а их электрические «молнии» при пробое могут убить мелкие существа, а в некоторых случаях нанести вред человеку. Речь идет об электрических рыбах. В настоящее время известны свыше 100 видов, способных вырабатывать электричество с достаточно высокой разностью потенциалов. Крупный электрический угорь из Амазонии может вызвать электрический разряд до 600 В при силе тока 1 А. Такой разряд способен свалить с ног лошадь и вызвать серьезные нарушения здоровья у людей. У гигантского ската, которого называют рыбой-торпедой (*Torpedo nobiliana*), обитающего в Средиземном море, электрический потенциал достигает значения 70-80 В. Откуда электрические угорь и скат черпают такую невероятную мощность? Как возникает такая большая разность потенциалов? Почему угорь и скат не поражают током самих себя?

8. Птицы на проводах. Все знают, как опасно для человека прикосновение к оголенным электрическим проводам, особенно высоковольтной сети. Такое прикосновение может быть смертельным для человека и для крупных животных. Однако птицы спокойно и совершенно безнаказанно усаживаются на провода. Причина такой безнаказанности заключается в следующем: тело сидящей на проводе птицы представляет собой как бы ответвление цепи, сопротивление которого по сравнению с другой ветвью – короткий участок между ногами птицы – очень большое. Поэтому сила тока в этой ветви (в теле птицы) ничтожна и безвредна.

Почему же птицы, сидящие на проводах обесточенной высоковольтной линии, моментально слетают с провода высокого напряжения, когда включают напряжение?

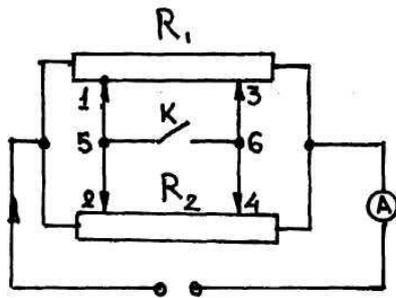


Рис. 9

9. *Пойдет ток или нет?* Проводники 1-2 и 3-4 присоединены к реостатам, полное сопротивление которых равно R_1 и R_2 , в точках с одинаковым потенциалом так, что ток по этим проводникам идти не будет (рис.9). Пойдет ли ток по проводникам 1-2 и 3-4 и по участку 5-6, если замкнуть ключ К? Изменится ли при этом показание амперметра?

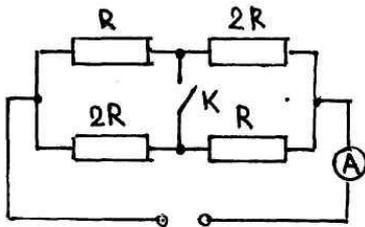


Рис. 10

10. *Изменится ли показание амперметра?* Четыре резистора включены в электрическую цепь, как показано на рис.10. Сопротивления резисторов даны на рисунке. Как изменится показание амперметра, если замкнуть ключ К?

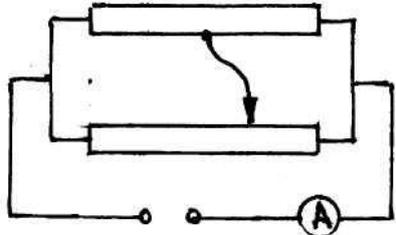


Рис. 11

11. *Сила тока при перемещении движка реостата.* Два одинаковых реостата соединены параллельно, и их движки соединены между собой. На одном реостате движок закреплен неподвижно в средней точке (рис.11). Как будут изменяться показания амперметра при перемещении движка второго реостата от одного конца реостата до другого?

12. *Движение электронов в металлах.* Носителями электрического тока в металлах являются электроны, которые движутся под действием электрического поля напряженностью E . Оно действует на электроны с силой $F = eE$, где e – заряд электрона. Почему же электроны не движутся равноускоренно?

13. *Электростатическое поле Земли.* На Земле сосредоточен заряд примерно в 1 Кл, который обнаруживается по наличию электростатического поля вокруг Земли. Исследования показали, что вблизи поверхности Земли напряженность электрического поля имеет величину более 100 В/м. Почему бы не получить с помощью этого поля постоянный электрический ток?

14. *Елочные гирлянды.* Елочные гирлянды часто делают из лампочек для карманного фонарика. Лампочки соединяют последовательно, и тогда на каждую из них приходится очень малое напряжение, не более 3 В. Почему же опасно, выкрутив одну из лампочек, сунуть палец в патрон?

15. *Освещение в трамвае.* Электрические лампочки в трамвае рассчитаны на 127 В. Откуда же берется напряжение для питания этих лампочек, ведь в трамвайном проводе постоянный ток с напряжением 600 В, а трансформировать постоянный ток нельзя?

16. *Оборвавшийся провод высокого напряжения.* Недалеко от человека оборвался провод высокого напряжения и упал на землю. Тотчас же по земле во все стороны от места падения начнет распространяться ток большой величины. Казалось бы, естественно, что на сухой земле человек в большей безопас-

ности, ведь мокрая земля лучше проводит электрический ток. В действительности происходит обратное. Почему?

17. **С какой стороны источник тока?** Имеется длинная двухпроводная линия, с одной стороны которой находится источник тока, с другой – нагрузка. С какой стороны находится источник тока, неизвестно. Как с помощью вольтметра определить, с какой стороны находится источник тока в двухпроводной линии?

18. **Как меняются показания вольтметра?** В качестве нагрузки в электрическую цепь включено проволочное кольцо со скользящим контактом В (рис.12).

Как будет меняться показание вольтметра при движении по однородному проволочному кольцу скользящего контакта?

19. **Сопротивление четырех резисторов.** Четыре одинаковых резистора, каждый сопротивлением R , включены в цепь так, как показано на рис.13. Чему будет равно сопротивление цепи между точками А и В?

20. **Сопротивление проволочного куба.** Проволочный куб изготовлен из проводников, которые являются ребрами куба. Каждый проводник имеет сопротивление R . Вычислить сопротивление этого куба, если он включен в электрическую цепь вершинами А и В (рис.14).

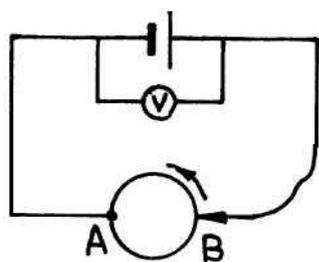


Рис. 12

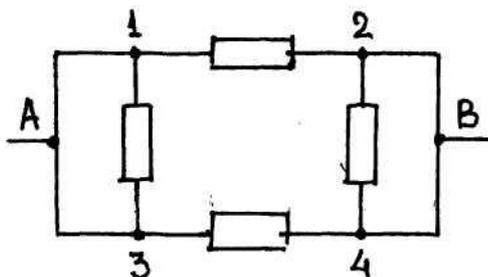


Рис. 13

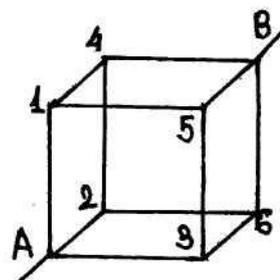


Рис. 14

21. **Как меняются показания амперметра?** Медная трубка, запаянная с концов и имеющая сверху отверстие, включена в электрическую цепь постоянного тока. Как изменится показание амперметра, если трубку заполнить водным раствором медного купороса?

22. **Короткое замыкание.** Чтобы электрические приборы работали при одинаковом напряжении, их включают параллельно. Почему тогда при коротком замыкании на одном приборе срабатывает автомат для всей цепи?

23. **Защита от короткого замыкания.** При подключении к дому или квартире переменного электрического тока с напряжением 220 В от трехфазной сети, в которой между двумя фазами напряжение составляет 380 В, используется два провода: «нуль» и «фаза». Для защиты электрической цепи от перегрузок и короткого замыкания на провода ставят предохранительные пробки (в настоящее время очень редко) или реле автоматического отключения. При этом запрещается ставить предохранительные устройства на оба провода, их ставят только на провод, по которому подводится «фаза». Почему?

24. **Лампочку можно включать и выключать в любом конце коридора.**

Длинный темный коридор освещается одной лампочкой, подвешенной в его середине. Дверь в комнату находится в другом конце коридора от входа в комнату. С целью экономии электроэнергии желательно освещать коридор только в тот момент, когда человек проходит по коридору. По какой схеме включения это может быть осуществлено?

25. **Как переделать электроплитку?** Электроплитка работает от сети напряжением 220 В. Как переделать эту плитку для работы под напряжением 110 В, не меняя и не укорачивая при этом спираль и имея в наличии один короткий проводник?

26. **Кое-что об аккумуляторах.** Кислотный аккумулятор, обладающий внутренним сопротивлением $r=0,3$ Ом, имеет надпись «ЭДС 12В, максимальный разрядный ток 10 А». Но, замкнув аккумулятор на внешнее сопротивление, например, $R=0,1$ Ом, получим ток $\frac{\varepsilon}{R+r} = \frac{12}{0,1+0,3} = 30$ А, то есть больше обозначенного в три раза. В чем причина расхождения?

27. **Неохлажденный конец проволоки нагревается сильнее.** По нихромовой проволоке пропускается ток такой силы, что она слегка накаляется (меняет цвет). После этого, поддерживая напряжение на концах проволоки неизменным, одну часть проволоки охлаждают (например, водой). Другая ее часть начинает накаляться сильнее. Объясните, почему при охлаждении одной части проволоки другая нагревается сильнее.

28. **Изменение сопротивления вытягиваемой проволоки.** Длину проволоки в результате вытягивания увеличили вдвое. Как изменилось ее сопротивление?

29. **Падение напряжения при включении электроприборов с нагревательным элементом.** При включении в сеть электроприборов с мощным нагревательным элементом (например, электрочайника) накал ламп в квартире сразу же заметно падает, но вскоре возрастает, достигая примерно прежнего уровня. Почему так происходит?

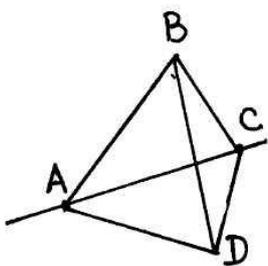


Рис. 15

30. **Сопротивление проволочного тетраэдра.** Чему равно сопротивление каркаса из однородной проволоки в виде тетраэдра, включенного в цепь двумя вершинами А и С (рис.15), если сопротивление каждого ребра тетраэдра равно R ?

31. **Сопротивление трех резисторов.** Три резистора, каждый сопротивлением R , включены последовательно. Затем точки А и С соединили проводником, сопротивление которого очень мало; соединяют также проводником точки В и D (рис.16). Чему равно сопротивление такой цепи?

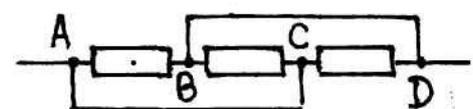


Рис. 16

32. **Сопротивление круглой пластины.** В электрическую цепь включена круглая металлическая пластина определенной толщины. Где на нижней и

верхней поверхностях пластины необходимо расположить электрические контакты, чтобы сопротивление между ними было минимальным?

33. **Уменьшение общего сопротивления при повышении всех видов сопротивлений.** Цепь переменного тока состоит из трех последовательно соединенных сопротивлений: омического, индуктивного и емкостного. Может ли одновременное увеличение каждого из них привести к уменьшению общего сопротивления?

34. **Сопротивление параллельных катушек.** В городскую сеть включили катушку с большим числом витков, намотанных на железный сердечник. Измерив сопротивление, получили 20 Ом. Затем поверх этой катушки намотали вторую проводами такой же длины, как у первой катушки, и включили в цепь параллельно первой катушке. Будет ли общее сопротивление катушек равно 10 Ом?

35. **Лампочка перегорает при включении.** Хорошо известная ситуация — лампочка накаливания почти всегда перегорает в момент включения. Почему?

36. **Показание вольтметра.** К реостату приложено напряжение U_0 . Движок реостата установлен точно посередине. Между движком и одним из концов реостата включают вольтметр V (рис.17), сопротивление которого нельзя считать бесконечно большим по сравнению с сопротивлением реостата. Какое напряжение покажет вольтметр (больше, меньше или равное $U_0/2$)?

37. **Сохранятся ли показания амперметров?** Проводник и полупроводник соединены параллельно (рис.18). При некотором напряжении показания обоих амперметров одинаковы. Сохранится ли равенство показаний амперметров, если увеличить напряжение источника тока?

38. **Сохранятся ли показания вольтметров?** Проводник и полупроводник соединены последовательно (рис.19), и к ним приложено такое напряжение, что показания вольтметров одинаковы. Сохранится ли это равенство, если увеличить напряжение источника тока?

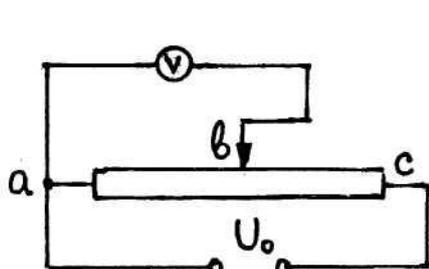


Рис. 17

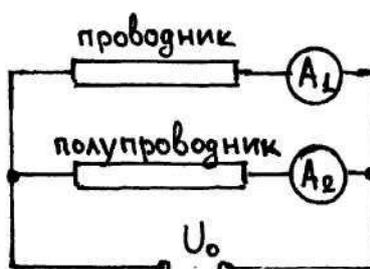


Рис. 18

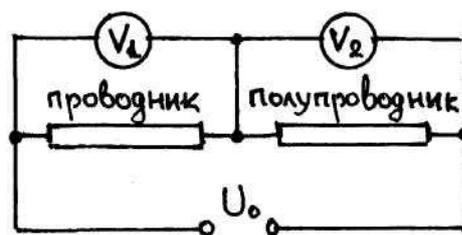


Рис. 19

39. **Измерение сопротивления резистора.** Как измерить величину неизвестного сопротивления резистора, имея вольтметр и амперметр с неизвестными внутренними сопротивлениями?

40. **Какая схема выгоднее для точного измерения?** На рис.20 изображены схемы для измерения сопротивления резистора с помощью амперметра и вольтметра. По какой схеме выгоднее включать приборы, чтобы измерить сопротивление более точно?

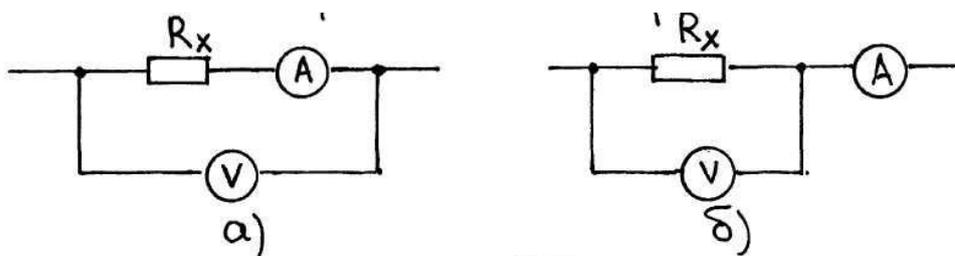


Рис. 20

41. **В каком проводе выделяется больше тепла?** Медная и железная проволоки равной длины и сечения включены в электрическую цепь параллельно. В какой из них выделяется большее количество теплоты за одно и то же время?

42. **Колебание груза на проволоке с током.** Между двумя опорами натянута проволока. К середине проволоки подвешен груз. При подключении концов проволоки к источнику тока груз начинает колебаться, и это колебания не затухают до тех пор, пока по проволоке идет ток. Почему груз находится в колеблющемся состоянии?

43. **Напряжение на спирали электроплитки.** Половину спирали от электроплитки растянули и спираль включили в сеть. Будут ли отличаться показания вольтметра, измеряющего напряжение на растянутой части спирали, от показаний на нерастянутой?

44. **Термопара.** Измерение температуры при контакте с исследуемой средой производится приборами, которые называют термометрами. Действие термометров основано на изменении в зависимости от температуры каких-либо физических свойств веществ: тепловое расширение жидкостей, газов и твердых тел (жидкостные и газовые термометры), электрическое сопротивление металлов и полупроводников (термометр сопротивления) или термоэлектродвижущая сила термопары. Как используются два первых свойства для измерения температуры, понять довольно легко, а как устроена термопара и как она работает?

45. **Изменение теплоотдачи электроплитки.** Как изменится теплоотдача электроплитки, если укоротить ее спираль?

46. **Максимальная мощность во внешней цепи.** Источник тока с электродвижущей силой \mathcal{E} и внутренним сопротивлением r питает внешнюю цепь сопротивлением R . При каком соотношении внутреннего и внешнего сопротивлений мощность, выделяющаяся во внешней цепи, будет максимальной? Каково при этом значение коэффициента полезного действия, если считать полезной мощность во внешней цепи?

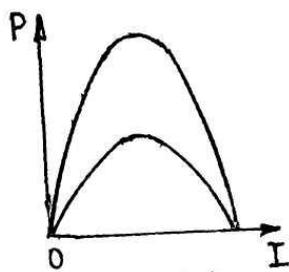


Рис. 21

47. **Мощность тока в двух цепях.** В двух цепях, содержащих каждая источник тока и внешнее сопротивление (нагрузка), максимальные силы тока одинаковы, а максимальная мощность во внешней цепи в одном случае в два раза больше, чем во втором (рис.21). Какими параметрами отличаются эти цепи?

48. **Распределение температуры в проводнике с током.** Участок проводника между точками А и В нагревается (рис.22) Вызывает ли это изменение распределения потенциалов вдоль проводника, по которому течет ток в направлении, указанном стрелкой? Не вызовет ли при этом прохождение тока изменение распределения температуры?

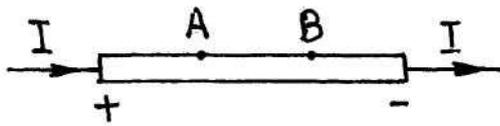


Рис. 22.

распределения потенциалов вдоль проводника, по которому течет ток в направлении, указанном стрелкой? Не вызовет ли при этом прохождение тока изменение распределения температуры?

49. **Нагревание провода с изоляцией и без.** Если пропустить ток одинаковой силы через провода равного сечения, но один провод не изолированный, а другой «одетый» в изоляцию, то естественно предположить, что более нагретым окажется изолированный провод. В действительности получается наоборот. В чем дело?

50. **Закон Джоуля-Ленца.** Закон Джоуля-Ленца может быть записан в виде $Q = I^2 R t$ или $Q = \frac{U^2}{R} t$, где I – сила тока, U – напряжение, R – сопротивление, t – время.

Таким образом, допуская справедливость обеих формул, мы приходим к противоречию: количество тепла, выделяющееся в проводнике при прохождении по нему электрического тока, одновременно и прямо пропорционально и обратно пропорционально сопротивлению участка цепи R ! Есть ли здесь противоречие?

51. **Электропроводность полупроводников.** Исследование проводимости полупроводниковых материалов производится в лабораториях со слабым освещением или вообще в темноте. Почему измерения электропроводности полупроводников производят в таких лабораториях?

52. **Полупроводник для постепенного увеличения силы тока.** Для постепенного увеличения силы тока в электродвигателе при его пуске последовательно с ним можно включить полупроводниковый материал. Почему именно полупроводник?

53. **Температура катода.** При исследовании двухэлектродной электронной лампы – диода прямого накала – были получены графики зависимости силы тока на аноде от напряжения на электродах диода (рис.23), снятые при различных значениях температуры катода. Какой график соответствует низкой температуре катода, а какой – высокой температуре катода?

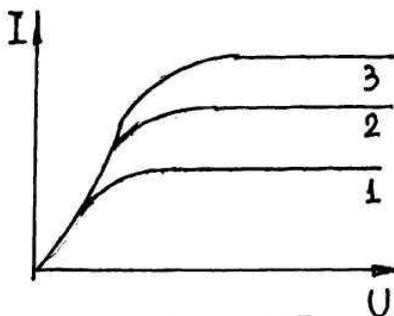


Рис. 23.

54. **Радиолампа в космосе.** Будет ли работать в открытом космосе радиолампа с разбитым стеклянным баллоном?

55. **Слой электронов над катодом.** Когда анодный ток в электронном диоде далек от насыщения (см. «Температура катода»), то вблизи поверхности катода образуется тонкий приграничный слой электронов. Большинство электронов из этого слоя возвращаются на катод, притягиваясь к нему, так как поверхность катода при выходе электронов заряжается положительно. Некоторая часть электронов диффундирует в противоположную сторону от катода и увле-

кается электрическим полем в направлении анода. На внешней границе приграничного слоя электронов можно считать, что электрическое поле будет нулевым. Почему?

56. **Трамвайная линия.** Трамвайная линия питается постоянным током, причем воздушный провод имеет положительный потенциал, а рельсы - отрицательный. Почему не наоборот?

57. **Воздушный пробой.** К полюсам источника постоянного тока присоединяются электроды в форме диска и острия. Электроды находятся на некотором расстоянии друг от друга по одной оси. К каким полюсам следует подключить диск и острие, чтобы воздушный пробой произошел при меньшей разности потенциалов между электродами?

58. **Грозовая туча и молния.** Грозовая туча образуется в жаркий день, когда воздух у поверхности земли сильно прогрет и хорошо насыщен водяными парами. Если с утра жарко и душно, стоит полная тишина, то бывалые люди уверенно предсказывают: «Парит! Быть грозе». Происходит мощная конвекция: потоки нагретого влажного воздуха устремляются вверх. Подъем теплых воздушных масс еще более усиливается, если ветер пригонит холодный воздух. Мощные восходящие потоки воздуха с содержащимися в них водяными парами поднимаются вверх, и на некоторой высоте пары конденсируются. Процесс конденсации паров продолжается при дальнейшем подъеме воздушных масс, вследствие чего облако быстро растет в высоту, постепенно превращаясь в грозовую тучу. Верхняя граница тучи находится на высотах 10-15 км. На таких высотах восходящие потоки затухают, и у вершины тучи возникает нисходящий поток холодного воздуха, который, попадая в нижние «этажи» тучи, не затухает, а, напротив, усиливается. Таким образом, наблюдается довольно сложная картина: наряду с восходящими потоками воздуха, нагретого у поверхности земли, возникают нисходящие потоки воздуха, охлажденного в верхней части тучи. Такая ситуация говорит о том, что в жизни грозовой тучи наступил этап ее зрелости.

У этапа зрелости грозовой тучи есть еще одна, и притом очень важная особенность. Речь идет о молниях. Они наблюдаются именно в зрелой грозовой туче. Молнии – характерная черта грозовой активности; их можно рассматривать в качестве определяющего признака грозы.

Молния и сопровождающий ее гром первоначально воспринималась людьми как выражение воли богов и, в частности, как проявление божьего гнева. Самый главный бог древних греков Зевс – был также богом молнии и грома. Его называли громовержцем, тучегонителем. Зевс хмурит брови – и сгущаются тучи. В гневе он поражает молнией, устрашает громом. Вместе с тем пытливый человеческий ум с древних времен пытался постичь природу молнии и грома. В древние века над этим размышлял древнегреческий философ Аристотель (384-322 до н.э.). Над природой молнии и грома задумывался Лукреций. Но только в середине XVIII столетия благодаря исследованиям американского физика Б.Франклина (1706-1790), русских ученых М.В. Ломоносова (1711-1765) и Г.В. Рихмана (1711-1753) была доказана электрическая природа молнии. Так как же все-таки возникает молния в грозовой туче?

59. **Сколько стоит молния?** Молния – мощный электрический разряд, при котором выделяется колоссальная электрическая энергия. Электрическую энергию, как известно, измеряют, оценивают и продают как товар. Попробуйте оценить, сколько стоит электрическая энергия, выделившаяся при грозовом разряде молнии, если цена одного кВт-часа равна 3 рубля.

60. **Молния и деревья.** Существует поверье о том, что там, где растут дубовые деревья вместе с другими породами, молния предпочитает ударять именно в дубы. И правда, среди разбитых молнией деревьев встречается много дубов. Естественно, очень трудно представить, что молния способна отличать дуб от других пород деревьев. Почему же чаще всего разбиваются именно дубы? Как вообще удар молнии разбивает дерево? Разумеется, не всегда удар молнии приводит к гибели дерева. Каким образом молния вызывает лесные пожары? Почему не каждый удар молнии в лесу приводит к пожару?

61. **Электрическое поле земли при ударе молнии.** Если нас застигла гроза, то не следует укрываться под деревом. Кроме того, нужно укрыться так, чтобы ваша голова находилась ниже окружающих предметов. Чем опасны деревья? Разве вы не находитесь в безопасности, если стоите на некотором расстоянии от ствола?

Можно ли при грозе лечь на землю?

Голова при этом, конечно будет находиться на минимально возможной высоте, но не возникает ли при этом какая-то другая опасность? Молния нередко поражает коров. Это связано не только с тем, что коровы обычно находятся на открытом воздухе, а в грозу укрываются под деревьями, но и с тем, что задние ноги коровы далеко отстоят от передних. В этом у них есть нечто общее с человеком, лежащим на земле. Почему так опасен удар молнии для лежащего на земле человека и коровы?

62. **Удар молнии в самолет.** Удары молнии в самолет случаются довольно часто, однако лишь изредка они причиняют какие-либо серьезные повреждения – разве что несколько мелких отверстий в фюзеляже. Автомобили, автобусы и другие транспортные средства тоже не страдают от ударов молнии. Почему молнии не причиняют вреда ни транспорту, ни пассажирам?

63. **Шаровая молния.** Иногда во время грозы в воздухе вблизи земли возникают светящиеся шаровидные образования, которые стали называть шаровой молнией, потому что она является как бы продолжением молнии при грозе. Очевидцы рассказывают, что светящиеся шары бесшумно «плавают» или «танцуют» на протяжении в большинстве случаев несколько секунд. Иногда они проходят сквозь оконное стекло, не оставляя следов, иногда же стекло лопаются. Такие шары наблюдали в закрытых помещениях (даже в самолете) и на улице. Хотя они обычно бесшумны, их исчезновение сопровождается хлопком. Они, наконец, иногда могут быть смертельно опасны. По-видимому, жертвой шаровой молнии и стал русский ученый Г.В. Рихман, соратник М.В. Ломоносова, когда он пытался повторить опыт Б. Франклина с воздушным змеем. Бледно-голубой огненный шар величиной с кулак отделился от громоотвода, установленного в лаборатории Рихмана, медленно приблизился к его лицу и взо-

рвался. Рихман, с багровым пятном на лбу и двумя отверстиями в одной из туфель, замертво упал на пол.

Шаровая молния, хотя и возникает во время грозы, имеет много отличий от обычной молнии. Обычная молния кратковременна; шаровая – живет иногда несколько минут. Обычная молния сопровождается громом; шаровая – почти бесшумна, движется по непредсказуемой траектории и не ясно, как она прекратит свое существование (тихо или со взрывом). Яркость света шаровой молнии сравнима с яркостью 100-ваттной лампочки накаливания. Чаще всего шаровая молния имеет желтый, оранжевый или красноватый цвет ($\approx 60\%$), реже имеет белый цвет и сине-голубой.

Как правило, шаровая молния имеет четкую границу, ограничивающую вещество молнии от воздушной среды. Диаметр шаровых молний (по наблюдениям) находится от долей сантиметра до нескольких метров. Чаще всего встречаются молнии диаметром 15-30 см.

Шаровая молния возникает где-то вверху, в тучах, затем приближается к поверхности земли. Оказавшись у поверхности земли, движется почти горизонтально на высоте около 1 м со скоростью 1-10 м/с, обычно повторяя рельеф местности и огибает проводящие ток объекты и людей. При этом молния обнаруживает явное «желание» проникнуть внутрь помещений.

Так как шаровая молния плавает над поверхностью земли, как бы находясь в состоянии невесомости, то очевидно, что вещество молнии имеет такую же плотность, как и воздух, то есть $\approx 1,3 \text{ кг/м}^3$. Во время грозы земля и объекты на ней заряжаются положительно, значит, шаровая молния, обходящая объекты и копирующая рельеф, также заряжена положительно.

Существование шаровой молнии – одна из загадок природы, на которую не могут дать ответ физики. При каких условиях возникает шаровая молния? Как ей удастся сохранить свою форму? Почему она светится и в то же время почти не излучает тепло? Каким образом она проникает в закрытые помещения? Неясных вопросов много, и все-таки попробуйте дать на них ответ или хотя бы выскажите предположение.

64. Термоэлектронная эмиссия. Между катодом и анодом термоэлектронной лампы приложено запирающее напряжение (минус на аноде и плюс на катоде). При этом температура катода достаточна для обеспечения термоэлектронной эмиссии. Если изменить направление электрического поля, приложив при этом между анодом и катодом такое напряжение, при котором возможно получение тока насыщения, то сохранится ли температура катода, которая существовала при запирающем направлении поля?

65. Глеющий разряд. Глеющий разряд – один из видов стационарного самостоятельного электрического разряда в газах. Происходит при низкой температуре катода, отличается сравнительно малой плотностью тока на катоде и большим (порядка сотни вольт) катодным падением потенциала. Глеющий разряд может возникнуть при давлениях газа от 10^{-4} мм рт.ст. вплоть до атмосферного, однако в основном разряд наблюдается при давлении от сотых долей до нескольких мм рт.ст.

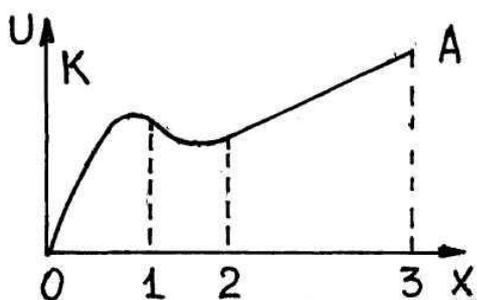


Рис. 24.

Распределение потенциала между катодом и анодом тлеющего разряда имеет вид, показанный на рис.24, где по оси абсцисс отложено расстояние от катода. На каких участках в пространстве имеется положительный объемный заряд, на каких – отрицательный и на каких объемный заряд практически равен нулю?

66. **Ток при газовом разряде.** В плазме газового разряда концентрация электронов и положительных ионов практически одинакова. Значит ли это, что плотности тока, обусловленные движением электронов и ионов, также одинаковы? Что покажет амперметр, включенный в цепь последовательно с газоразрядным промежутком, - сумму или разность электронного и ионного токов?

67. **Зажигание неоновой лампы.** Неоновая лампа – газоразрядный источник света, в котором оптическое излучение возникает при электрическом тлеющем разряде в неонгелиевой смеси. Разряд в лампе начинается при определенном напряжении, которое носит название напряжение зажигания. Для определения напряжения зажигания неоновой лампы собирается электрическая установка, с помощью которой можно менять напряжение, подаваемое на лампу, от нуля до любого значения. Если установку включить в сеть переменного тока и постепенно увеличивать подаваемое на лампу напряжение, то она зажигается в тот момент, когда вольтметр (электромагнитной системы) показывал 50 В. Если же установка включалась в сеть постоянного тока, то лампа загоралась, когда вольтметр показывал 70 В.

Так каково же напряжение зажигания неоновой лампы на самом деле?

68. **Действующие значения тока и напряжения.** Мгновенное значение переменного тока все время изменяется по синусоидальному закону, колеблясь между нулем ($i=0$) и некоторым наибольшим его значением ($i=I_0$). Очевидно, что средняя величина тока за полный период его изменения равна нулю, независимо от того, какие значения она принимает в различные моменты времени. Следовательно, ею нельзя оценивать величину переменного тока.

При установлении значения величины переменного тока исходят из таких его действий, которые не зависят от направления тока и могут быть вызваны также постоянным током. К ним относятся тепловые действия тока. Действительно, если через проводник проходит ток, то выделяемое в нем количество тепла пропорционально силе тока в квадрате (I^2), то есть не зависит от направления.

Переменный ток, проходящий по проводнику данного сопротивления, каждую секунду выделяет в нем некоторое количество теплоты. Если пропустить по этому проводнику постоянный ток, чтобы в секунду выделялось такое количество теплоты, как и в случае переменного тока, то величина постоянного тока в этом случае будет являться действующим (эффективным) значением переменного тока.

Для синусоидального переменного тока действующее значение силы переменного тока равно силе постоянного тока, выделяющего в цепи такое же количество теплоты, что и переменный ток за то же время. Действующее значение силы тока (I_g) меньше амплитудного (максимального) в $\sqrt{2}$ раза, то есть $I_g = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$. Точно так же действующее значение напряжения меньше амплитудного значения в $\sqrt{2}$ раза, $U_g = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$. В России и Европе промышленная частота переменного тока равна 50 Гц, а действующее значение напряжения равно 220 В. В США пользуются переменным током частотой 60 Гц.

Какое значение действующей силы переменного тока I_g будет больше: при частоте 50 Гц или при частоте 60 Гц?

69. Размагничивание часов. Для размагничивания случайно намагниченных часов их помещают в соленоид, по которому протекает переменный ток. Затем часы медленным движением удаляют из соленоида. Объяснить, почему при этом происходит размагничивание.

IV. Подсказки

1. Собственное поле проводника будет противоположно внешнему полю.
2. Электрическое поле распространяется по поверхности проводника со скоростью света.
3. Поражающее действие тока определяется главным образом силой тока.
4. Электрический импульс, проходящий по руке, приводит к сокращению мышц.
5. Степень поражения человека при ударе молнии зависит от того, как течет ток: через тело человека или по его мокрой одежде.
6. Сокращение мышц происходит при превращении химической энергии в механическую работу под действием электрического импульса.
7. В живой клетке при диффундировании ионов через оболочки возникает разность потенциалов.
8. На перьях птицы при включении напряжения возникает статический электрический заряд.
9. Проводники, присоединенные к реостатам, находятся при различных потенциалах.
10. Параллельное соединение резисторов при замыкании ключа становится последовательным.
11. Если движок одного реостата стоит неподвижно, а движок второго реостата перемещается, происходит изменение общего сопротивления цепи.
12. Электроны при своем движении постоянно сталкиваются с атомами.
13. Для получения электрического тока необходимы неэлектростатические сторонние силы.
14. Сопротивление лампочек гирлянды маленькое, а сопротивление пальца человека очень большое.
15. Лампочки включаются последовательно.

16. Человек вместе с землей образуют разветвленную цепь с параллельно включенными участками.
17. Необходимо использовать вольтметр для измерения падения напряжения на разных участках.
18. При параллельном соединении проводников общее сопротивление всегда меньше самого маленького.
19. Если резистор подключен к точкам с одинаковым потенциалом, то по нему ток не идет и его сопротивление в цепи равно нулю.
20. Точки с одинаковым потенциалом можно объединить в одну.
21. Водный раствор медного купороса – хороший проводник.
22. При параллельном соединении общее сопротивление всегда меньше самого меньшего сопротивления, включенного в цепь.
23. Нулевой провод может быть заменен заземлением.
24. Необходимо в цепь поставить два переключателя на два направления.
25. Необходимо два участка спирали включить параллельно.
26. Данные об ЭДС и силе тока аккумулятора говорят о нормальной эксплуатации.
27. При охлаждении проволоки уменьшается ее электрическое сопротивление, а ток в цепи при этом увеличивается.
28. При изменении в результате вытягивания длины провода изменяется его сечение.
29. При малом сопротивлении очень большая потребляемая мощность.
30. Электрический ток по участку цепи, на концах которого одинаковые потенциалы, не идет.
31. Сопротивление проводов АВ и ВD (рис.16) очень мало.
32. Сопротивление проводника $R = \rho \frac{l}{S}$, где ρ – удельное сопротивление, l – длина проводника, S – сечение проводника.
33. Рассмотреть резонанс в цепи переменного тока.
34. Активное сопротивление катушек уменьшится в два раза, а индуктивное не изменится.
35. Сопротивление нити накаливания при низкой температуре мало, а ток большой.
36. Если сопротивление вольтметра соизмеримо с сопротивлением измеряемого участка, то при измерении напряжения будет ошибка.
- 37, 38. При повышении температуры сопротивление проводника увеличивается, а полупроводника – уменьшается.
39. Измерение производим по двум схемам: по первой схеме включаем параллельно вольтметр и амперметр, по второй схеме к последовательно включенным неизвестным сопротивлением и амперметром параллельно подключается вольтметр.
40. Ответ зависит от того, какой прибор лучше и точнее – амперметр или вольтметр.
41. Количество теплоты, выделившейся в проводе, зависит от длины проводника.

42. Сила тока и, соответственно, количество выделившегося тепла в проволоке определяется сопротивлением, которое зависит от длины проводника.

43. При охлаждении сопротивление металлических проводников уменьшается.

44. Возникающая ЭДС в месте контакта двух разнородных проводников и ее зависимость от температуры используется в термопаре для измерения температуры.

45. При одинаковом напряжении количество тепла зависит от сопротивления на проводе.

46. Необходимо исследовать на максимум зависимость мощности от внешнего сопротивления.

47. При коротком замыкании сила тока максимальна, а максимальная мощность во внешней цепи будет при равенстве внешнего и внутреннего сопротивлений.

48. При нагревании проводника наблюдается диффузия электронов.

49. У изоляции меньше тепловое сопротивление, чем у воздуха.

50. Закон Джоуля-Ленца справедлив в обоих случаях, так как по закону Ома $I=U/R$.

51. Энергия светового излучения приводит к созданию свободных электронов и дырок.

52. Сопротивление полупроводников при повышении температуры уменьшается.

53. Количество электронов, покидающих нагретый катод, зависит от температуры.

54. Открытый космос является вакуумным пространством.

55. Если электрическое поле в данной точке пространства отлично от нуля, то электроны будут уходить от этой точки.

56. На положительном электроде при электролизе может выделяться кислород.

57. В металлическом проводнике свободные носители заряда – электроны. Плотность зарядов растет с увеличением кривизны поверхности.

58. В результате процесса ионизации грозное облако накапливает заряды и при соответствующей напряженности электрического поля происходит разряд.

59. Потенциал грозного облака равен примерно 50 млн. вольт, максимальный ток при разряде около 100 тыс. ампер (его определяют по степени намагничивания стального стержня катушки, по которой проходит ток при ударе молнии в громоотвод). Длительность разряда составляет 0,0001 секунды (см. «Грозная туча и молния»).

60. У дуба кора очень неровная, и он при дожде во время грозы долго намокает.

61. От точки попадания молнии в землю ток идет от этой точки по поверхности земли по всем направлениям.

62. Ток молнии идет по поверхности металлических корпусов транспортных средств.

63. Рассмотрите варианты с ионизированным газом или образованием кластера.

64. При вылете электронов с катода необходима затрата энергии.

65. На графике зависимости напряжения при разряде от расстояния до катода на выпуклых участках положительные заряды, на вогнутых – отрицательные, на прямых – заряд равен нулю.

66. Знаки плотности ионов и электронов совпадают, и амперметр покажет суммарный ток.

67. При переменном токе действующее или эффективное напряжение в $\sqrt{2}=1,41$ раз меньше амплитудного.

68. Действующие значения тока и напряжения зависят только от их амплитудных значений.

69. При переменном токе напряженность магнитного поля в стали убывает в результате сужения петли гистерезиса.

V. Ответы

1. После внесения проводника в поле в нем начинается перемещение зарядов (они находятся в свободном состоянии). Перемещение будет происходить до тех пор, пока в проводнике не образуется поле, противоположное по направлению и равное по величине первоначальному. Складываясь, эти поля компенсируют друг друга, и тока в проводнике не будет.

2. Электроны движутся по цепи со скоростью около 0,1 мм в секунду, однако сигнал (изменение электрического поля в проводнике) распространяется по поверхности проводника со скоростью света. Свет зажигается, когда до лампочки доходит именно сигнал, а не сами электроны. Этот сигнал как бы «дает команду» к началу движения всех свободных электронов. Сигнал может дойти до нити накала за время, равное 1 нс (наносекунда, или 10^{-9} с). Однако, чтобы нить начала светиться видимым светом, электрический ток должен нагреть ее до температуры порядка 3500°C . Такая температура обычно достигается через 0,01-0,1 с после включения света.

3. В результате длительных наблюдений воздействия электрического тока, протекающего через тело человека, были получены следующие данные при различных значениях силы тока:

1. Менее 0,01 А – либо совсем не ощущается, либо ощущается слабо;

2. Менее 0,02 А – вызывает болезненные ощущения, иногда рука как бы притягивается к проводу;

3. Менее 0,03 А – нарушается дыхание;

4. Менее 0,07 А – сильно затрудняется дыхание;

5. Менее 0,1 А – вызывает фибрилляцию сердца, возможен смертельный исход;

6. Менее 0,2 А – вызывает сильный ожог и остановку дыхания.

Смертельный исход чаще всего вызывает ток в диапазоне 0,1-0,2 А, так как при этом возникают бесконечные неконтролируемые сокращения сердечной мышцы (фибрилляция) и, соответственно, нарушение кровообращения, что

быстро приводит к смерти. При силе тока более 0,2 А сердце просто останавливается, но если пострадавшему своевременно оказывают помощь, сердечный ритм восстанавливается. Фибрилляцию же можно остановить хорошо рассчитанным повторным электрическим шоком. Поэтому ток в диапазоне 0,1-0,2 А опаснее, чем более сильный ток.

Величина тока, проходящего через тело человека, зависит от сопротивления, прежде всего, кожи, которое обычно изменяется в пределах от 1000 Ом (для влажной кожи) до 500000 Ом (для сухой кожи). Сопротивление тканей тела значительно меньше: 100÷500 Ом. Когда человек касается провода, находящегося под напряжением около 240 В, ток пробивает кожу. Если по проводу течет ток, величина которого еще не смертельна, но достаточна для того, чтобы вызвать непроизвольно сокращение мышц руки (рука как бы «прилипает» к проводу), то сопротивление кожи постепенно уменьшается, и в конце концов ток достигает смертельной для человека величины в 0,1 А. Человека в этом случае нужно как можно быстрее «оторвать» от провода, не подвергая опасности при этом себя.

4. Если человек схватился рукой за оголенный электрический провод с током, то «прилипание» руки к проводу обусловлено не электрическими силами. Проходя по мышцам руки, электрический ток заставляет их сокращаться, и рука крепко схватывает провод (см. «Лягушачьи лапки»). Электрики, работая с проводами, которые могут находиться под напряжением, стараются прикасаться к проводам тыльной стороной руки. В этом случае сокращения мышц отбрасывают руку от провода.

5. Когда через тело человека проходит значительный ток, смерть может наступить от внутренних ожогов. Но если одежда и кожа мокрые, то разряд молнии может и не проникнуть в тело: основная часть тока пройдет по слою воды на поверхности кожи (см. «Молния и деревья»). В этом случае у человека в результате электрического шока могут прекратиться сердечная деятельность и дыхание. Однако вовремя сделанное энергичное искусственное дыхание быстро возвращает человека к жизни. Нередко человека поражает не прямой удар молнии, а ответвленные по земле токи (см. «Электрическое поле в земле при ударе молнии») или вторичный разряд от предмета, в который попала молния. Некоторые даже утверждают, что большинство жертв молнии погибают только потому, что их слишком рано начинают считать умершими. Поэтому людям при поражении молнией, как и при любом поражении электрическим током, следует немедленно оказывать помощь.

6. Вопрос о сокращении мышцы не совсем физический, и все-таки. В настоящее время известно, что сокращение мышцы является результатом происходящего в соответствующих тканях прямого превращения химической энергии в механическую работу. Сокращающаяся мышца использует энергию, запасенную в молекулах аденозинтрифосфорной кислоты (молекулы АТФ). Эти молекулы являются биологическим аккумулятором энергии. Аккумулятор разряжается при химических процессах, сопровождающих сокращение мышцы, и заряжается при химических процессах, сопровождающих дыхание.

Управляются химические процессы электрическими импульсами, поступающими из мозга и мышечной ткани по специальным нервным клеткам – нейронам. Электрический сигнал, несущий мышцам команду сокращаться, распространяется за время порядка миллисекунды. В любом живом организме и даже в отдельных живых клетках создаются электрические напряжения, которые называют биопотенциальными. «Биологическое электричество» является неотъемлемым свойством всей живой материи. Оно возникает при функционировании нервной системы, при работе желез и мышц. Так, работающая сердечная мышца создает на поверхности тела ритмично изменяющиеся электрические потенциалы. Изменение этих потенциалов со временем может быть зафиксировано в виде электрокардиограммы и энцефалограммы, позволяющих судить о работе сердца.

Таким образом, чтобы заставить мышцу сокращаться, нужен электрический импульс. Этот импульс может поступить по нейронам или от какого-то внешнего источника тока. В рассматриваемом опыте Гальвани таким источником тока была контактная разность потенциалов. В точке соприкосновения двух разных металлов (в нашем случае железо-бронза) возникает контактная разность потенциалов, которая обусловлена различием энергетических уровней электронов проводимости в этих металлах. Когда лапка лягушки прикасалась к основанию кронштейна, электрическая цепь, образованная переключателем, кронштейном и лапкой, замыкалась, по ней начинал идти ток, который и вызывал сокращение мышц лапки; цепь размыкалась, сокращение прекращалось, и лапка снова касалась основания, и далее все повторялось.

7. Под воздействием нервного импульса некоторые особые клетки создают поток ионов (электрический ток) через свои мембраны, что приводит к возникновению биопотенциалов на клеточном уровне. Через внешнюю мембрану (оболочку) живой клетки все время проходят ионы натрия и калия. При этом клетка старается как бы обменять натрий на калий: в клетке действует своего рода «ионный насос», который «накачивает» в клетку ионы калия и изгоняет из клетки ионы натрия. Этот насос использует химическую энергию молекулы АТФ (см. «Лягушачьи лапки»). Как он действует, до сих пор неизвестно. Обычно внутри клетки концентрация ионов калия выше, а ионов натрия ниже, чем снаружи.

Кроме положительно заряженных ионов калия и натрия, в растворах внутри и вне клетки имеются отрицательно заряженные ионы хлора. Клеточная мембрана обладает свойством пропускать ионы калия и натрия и не пропускать ионы хлора. Если концентрация ионов калия и хлора внутри клетки больше, чем снаружи, то вследствие разницы концентраций ионы калия будут диффундировать сквозь мембрану из клетки наружу, ионы же хлора будут оставаться внутри клетки. В результате на данном участке мембраны возникает разность потенциалов: область с внутренней стороны мембраны будет заряжена отрицательно, а с внешней положительно. Обычно живая клетка имеет по отношению к внешней среде отрицательный потенциал, 0,01-0,08 В, а в некоторых случаях может иметь значение до 0,15 В.

У электрической рыбы эти клетки соединены последовательно от головы до хвоста, и между головой и хвостом создается большая разность потенциалов. Множество таких последовательных цепочек электрических клеток соединяются параллельно. В результате возникает ток, достаточный для того, чтобы оглушить или даже убить жертву или врага. У гигантского морского ската (рыба-торпеда), по оценке ученых, параллельно соединены 2000 цепочек, каждая из которых содержит около 1000 соединенных последовательно электрических клеточек. При подобном последовательно-параллельном соединении через каждую клетку течет слабый ток, а суммарный ток достаточно велик. У пресноводных электрических рыб последовательно соединяется большее число клеток, так как проводимость пресной воды значительно меньше, и, чтобы рыба могла создать ток такой же величины, как у морского ската, разность потенциалов между ее головой и хвостом должна быть значительно больше.

8. При включении высокого напряжения на перьях птицы возникает статический электрический заряд, из-за наличия которого перья птицы расходятся. Это действие статического заряда пугает птицу, и она улетает.

9. Проводники 1-2 и 3-4 находятся при различных потенциалах, и поэтому при замыкании ключа К (рис.9) ток пойдет от точки 5 к точке 6, а по реостатам пойдут токи от точки 1 к точке 5, от точки 2 к точке 5, от точки 6 к точке 4 и от точки 6 к точке 3. Замыкание ключа приведет к увеличению тока, текущего через амперметр, так как сопротивления проводников 1-2, 3-4 и 5-6 весьма малы, то участки реостатов 1-3 и 2-4 окажутся практически закороченными.

10. До замыкания ключа цепь состоит из двух параллельно соединенных сопротивлений по $3R$ каждое. Таким образом, полное сопротивление цепи равно $1,5R$. После замыкания ключа К (рис.10) образуются два последовательно включенных участка, каждый из которых имеет два параллельных сопротивления. Сопротивление R_x каждого участка определяется из уравнения

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R} + \frac{1}{2R}.$$

Отсюда $R_x = 2/3R$, и все сопротивление цепи равно $4/3R$. Так как сопротивление цепи уменьшилось, то сила тока, измеряемая амперметром, увеличится.

11. Так как реостаты одинаковые, то их сопротивления также одинаковы и равны R . В том случае, если движок стоит посередине на каждом реостате, то общее сопротивление цепи равно $R/2$. Действительно, так как движки соединены проводником, в цепи образуются два последовательно включенных участка, каждый из которых имеет два параллельных сопротивления. Следовательно, если движки находятся посередине каждого реостата, сопротивление каждого участка равно $R/4$, а общее сопротивление цепи равно $R/4 + R/4 = R/2$.

Если движок во втором реостате стоит в любом крайнем положении, то, предполагая сопротивление проводника, соединяющего реостаты, равным нулю, имеем параллельно соединенные сопротивления R и $R/2$, так что общее сопротивление этого участка равно $R/3$. Сопротивление второго участка равно $R/2$, а общее сопротивление всей цепи получим равным $5/6R$. Показание амперметра в этом случае окажется в $5/3$ раза меньше. Таким образом, при пере-

мещении движка от одного конца реостата к другому показанию амперметра проходит через максимум, когда оба движка находятся посередине того и другого реостата.

12. Электроны в металлическом проводнике под действием силы $F = eE$ двигаются с ускорением на очень коротком расстоянии между двумя атомами, затем сталкиваются с атомом и теряют свою скорость. В среднем получается движение с постоянной очень малой скоростью (см. «Пора зажигать свет»). С ускорением электроны будут двигаться только в вакууме.

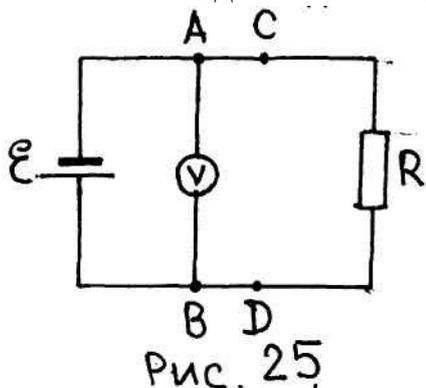
13. Наличие электрического поля вблизи поверхности Земли недостаточно для появления электрического тока. Чтобы в замкнутой цепи возник постоянный электрический ток, необходимы неэлектростатические сторонние силы, т.е. необходим источник тока. А тогда зачем электростатическое поле Земли?

14. Сопротивление лампочки от карманного фонаря очень мало – всего несколько Ом. Сопротивление пальца – несколько тысяч Ом. При последовательном соединении падения напряжения на участках цепи пропорциональны сопротивлениям участков; поэтому на палец, если его сунуть в патрон, придется практически все напряжение сети.

15. Проблема решается очень просто. Лампочки трамвая включаются последовательно по шесть штук на напряжение 600 В. Таким образом, каждая из лампочек трамвая находится под напряжением около 100 В.

16. Хорошая проводимость мокрой земли делает ее более безопасной. Человек вместе с землей образует разветвленную цепь, где токи распределяются обратно пропорционально сопротивлениям (параллельное включение). Сопротивление человеческого тела достигает нескольких тысяч омов. Оно несравненно больше сопротивления земли. Поэтому те сравнительно небольшие разности потенциалов, которые оказываются приложенными к ногам человека, при наличии хорошего параллельного проводника (мокрой земли) не могут вызвать в теле смертельный ток (см. «Поражение электрическим током»).

17. Допустим, в двухпроводной цепи источник тока находится слева (рис.25). Для подтверждения этого подсоединяем к точкам А и В, а затем к точкам С и D, лежащим несколько правее, вольтметр. Показания вольтметра между точками А и В – U_1 , между точками С и D – U_2 . Если U_1 больше U_2 , то источник находится слева от точек А и В: показания вольтметра при переходе к точкам С и D уменьшается за счет падения напряжения на участках АС и ВD. Если бы U_2 было больше U_1 , то источник бы находился в правом конце линии.



Эта задача решается одинаково для цепей переменного и постоянного тока, необходимо только, чтобы чувствительность вольтметра была достаточно высокой, чтобы регистрировать в общем-то малое изменение разности потенциалов при переходе от положения АВ к положению CD.

18. Кольцо в цепи является параллельным соединением двух проводников. При движении контакта из точки В (рис.12) длина одного из двух провод-

ников уменьшается и, соответственно, уменьшается его сопротивление. Общее сопротивление двух параллельно включенных проводников также будет уменьшаться, так как общее сопротивление параллельно включенных проводников всегда будет меньше самого маленького сопротивления. Так как общее сопротивление кольца при движении контакта уменьшается, то падает и напряжение на зажимах источника.

19. Сопротивление цепи равно $R/2$, так как резисторы, включенные между токами 1 и 3 (R_{13}), а также между точками 2 и 4 (R_{24}) не работают, а два других резистора включены параллельно (рис.13). Через R_{13} ток не идет, так как потенциалы точек 1 и 3 одинаковы. Не идет ток и через R_{24} , так как потенциалы точек 2 и 4 одинаковы. Следовательно, ток проходит по резисторам, включенным между точками 1 и 2 и между точками 3 и 4, а они включены параллельно.

20. Схема включения куба имеет симметрию (рис.14). Точки куба 1,2 и 3 имеют одинаковый потенциал, и поэтому все эти точки можно соединить в одну точку С. Между этой точкой и вершиной А включено три параллельных сопротивления, общее сопротивление которых равно $R/3$. Аналогично, точки 4, 5 и 6 также имеют одинаковый потенциал, и их можно соединить в одну точку D. Между точками В и D сопротивление также равно $R/3$. Между точками С и D включено шесть параллельных проводников (рис.26), для которых общее сопротивление равно $R/6$. Таким образом, эквивалентная схема имеет три последовательно включенных участка и общее сопротивление всей цепи $R_{\text{общ}} = \frac{R}{3} + \frac{R}{3} + \frac{R}{6} = \frac{5}{6}R$.

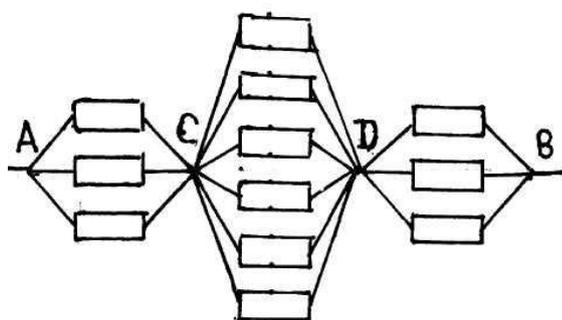


Рис. 26.

Между этой точкой и вершиной А включено три параллельных сопротивления, общее сопротивление которых равно $R/3$. Аналогично, точки 4, 5 и 6 также имеют одинаковый потенциал, и их можно соединить в одну точку D. Между точками В и D сопротивление также равно $R/3$. Между точками С и D включено шесть параллельных проводников (рис.26), для которых общее сопротивление равно

$R/6$. Таким образом, эквивалентная схема имеет три последовательно включенных участка и общее сопротивление всей цепи $R_{\text{общ}} = \frac{R}{3} + \frac{R}{3} + \frac{R}{6} = \frac{5}{6}R$.

21. Водные растворы кислот, щелочей и солей обладают хорошей проводимостью. Объясняется это тем, что значительная часть молекул этих веществ при растворении диссоциирует (разлагается) на положительные ионы или катионы (ионы металлов и водорода) и на отрицательные ионы или анионы (ионы кислотных остатков и гидроксильной группы). В водном растворе медного купороса это положительные ионы меди Cu и отрицательные ионы кислотного остатка SO_4 .

Заполнив медную трубку раствором медного купороса, мы как бы включаем в цепь параллельно трубке еще одно сопротивление. Следовательно, общее сопротивление цепи уменьшится, а сила тока увеличится, показание амперметра увеличится.

22. При коротком замыкании на одном из электрических приборов его сопротивление становится равным нулю или близким к нулю. Общее сопротивление при параллельном включении определяется как сумма обратных значений сопротивлений на каждом электрическом приборе. А так как на одном из приборов, где произошло короткое замыкание, сопротивление равно нулю, то и

общее сопротивление всей цепи будет равно нулю. Поэтому автомат отключает всю цепь.

23. Если поставить защитные устройства на нулевом и фазном проводах, то в случае перегрузки может случиться, что защитное устройство сработает на нулевом проводе, а не на фазном. В этом случае электрическая цепь будет разорвана, а вся проводка останется под напряжением относительно земли.

24. Для того, чтобы лампочку можно было включать и выключать в любом конце коридора, необходимо в двухпроводной цепи использовать вместо выключателей переключатели на два направления.

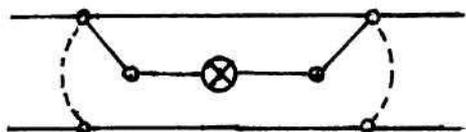


Рис. 27

выключателей переключатели на два направления. На рис. 27 представлена одна из простейших возможных схем, удовлетворяющая поставленному требованию.

25. Для того, чтобы переделать электроплитку, рассчитанную на напряжение 220 В, на напряжение 110 В, не меняя и не укорачивая спираль, необходимо сделать следующее. Один конец спирали отсоединяют от клеммы и присоединяют оба конца спирали к одной клемме (на рисунке провод отсоединен от клеммы 2 и присоединен к клемме 1).

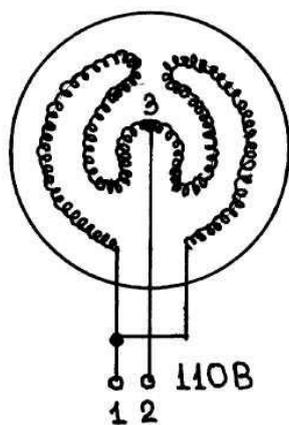


Рис. 28

Затем отдельным проводником соединяют середину спирали (точка 3) с другой клеммой (с клеммой 2). Таким образом, получим две параллельно включенные спирали, работающие под напряжением 110 В (рис.28).

26. На аккумуляторе обозначен максимально допустимый при нормальной эксплуатации ток. Фактически, при перегрузках можно получить значительно больший ток. Нужно лишь иметь в виду, что при перегрузках происходит разрушение пластин аккумулятора и он быстро выходит из строя. Особенно чувствительны к перегрузке свинцовые аккумуляторы обычного типа, в которых положительный электрод выполнен из диоксида свинца, отрицательный – из губчатого свинца.

На автомашинах устанавливаются так называемые стартерные аккумуляторы. В этих аккумуляторах принимаются специальные меры, чтобы при запуске двигателя можно было на короткий срок получить токи в сотни ампер, не опасаясь за сохранность пластин. Щелочные аккумуляторы меньше боятся перегрузок, так как обладают значительным внутренним сопротивлением, ограничивающим ток.

27. Сопротивление металлических проводников зависит от их температуры; при повышении температуры сопротивление проводников увеличивается. Поэтому сопротивление охлажденной части проволоки становится значительно меньше сопротивления неохлажденной части. Так как напряжение на концах проводника не меняется, то возрастает ток в цепи. Следовательно, через обе части проволоки начинает проходить ток большей силы и большая часть тепла будет выделяться на неохлажденной половине проволоки, где сопротивление больше.

28. Сопротивление провода зависит от его длины l и сечения S : $R = \rho \frac{l}{S}$, где ρ – удельное сопротивление. Объем провода $V=lS$. При вытягивании провода если его длина увеличилась вдвое, то при неизменном объеме сечение провода уменьшилось вдвое. Таким образом, сопротивление вытянутого провода станет в четыре раза больше, так как его длина увеличилась вдвое, а сечение уменьшилось вдвое.

29. Мощность, потребляемая электроприбором с нагревательным элементом, в первый момент после включения во много раз больше номинальной, так как сопротивление холодного нагревательного элемента мало. Поэтому велико падение напряжения на подводящих проводах. По мере нагревания элемента его сопротивление увеличивается и мощность падает, приближаясь к номинальной.

30. Потенциалы точек В и D (рис.15) равны, поэтому сопротивление участка BD из цепи можно исключить, и тогда к вершинам А и С будут подключены три участка: АС, АВС и АСD, два сопротивления $2R$ и одно R . Все три участка подключены параллельно, и общее сопротивление тетраэдра будет равно $R/2$.

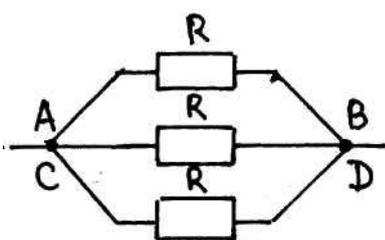


Рис. 29

31. Точки А и С (рис.16) имеют одинаковые потенциалы; точки В и D также имеют одинаковые потенциалы. Поэтому эквивалентная схема будет выглядеть так, как показано на рис.29. Получается, что три резистора сопротивлением R подключены параллельно и общее сопротивление такой цепи будет равно $R/3$.

32. Сопротивление проводника R зависит от удельного сопротивления ρ металла, из которого изготовлен проводник, сечения проводника S и его длины l , $R = \rho \frac{l}{S}$. Если контакты присоединены к нижней и верхней поверхностям круглой пластины в произвольных точках, например, в точках А и В (рис.30), то сечение проводника, перпендикулярное направлению АВ, будет малым (сечение 1234), а расстояние l (между точками А и В) будет большим и, соответственно, сопротивление проводника будет большим.

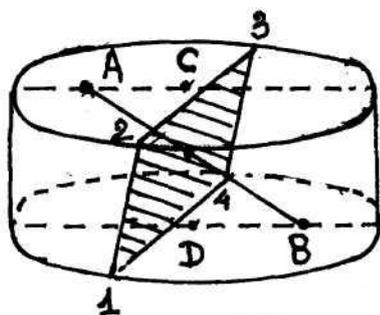


Рис. 30.

По мере уменьшения расстояния между точками А и В сечение проводника в этом направлении будет увеличиваться, а сопротивление будет уменьшаться. Самое минимальное сопротивление круглой пластины будет в том случае, когда электроды касаются центра пластины с разных сторон, так как расстояние между точками присоединения будет минимальным (точки С и D), а сечение проводника будет максимальным (площадь круга).

33. Полное сопротивление в цепи переменного тока, состоящей из резистора, индуктивности и конденсатора, включенных последовательно, определя-

ется по формуле $Z = \sqrt{R^2 + X_L - X_C^2}$, где R – сопротивление резистора, $X_L = L\omega$ – индуктивное сопротивление, $X_C = \frac{1}{\omega C}$ – емкостное сопротивление, L – индуктивность катушки, C – емкость конденсатора, ω – круговая частота. Если одновременно увеличивать все виды сопротивления, то уменьшение общего сопротивления может наступить, как следует из формулы, когда X_L будет равно X_C , то есть $X_L = X_C$ (резонанс в цепи переменного тока).

34. Ток в городской сети является переменным, и поэтому сопротивление катушки равно $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$, где R – омическое (или активное) сопротивление, $X_L = L\omega$ – индуктивное сопротивление, L – индуктивность катушки, ω – круговая частота. После того, как на первую катушку намотали вторую и включили параллельно первой, активное сопротивление стало вдвое меньше, а индуктивное сопротивление практически осталось прежним (роль второй катушки сводится к увеличению поперечного сечения первой, а сердечник остался прежний). Следовательно, сопротивление Z уменьшится менее чем в два раза, то есть сопротивление катушек будет больше 10 Ом.

35. Нить лампочки накаливания при включении нагревается не сразу. Так как сопротивление ненагретой нити мало, то некоторое время после включения лампочки в сеть через нее течет большой ток. Сопротивление тонких небольших участков нити больше сопротивления других таких же по длине, но более толстых участков. Поэтому на тонких участках выделяется больше тепла. Теплоотвод же, пропорциональный площади поверхности участка, меньше, чем в случае толстого участка. Это приводит к тому, что тонкие участки нагреваются значительно быстрее всей нити, причем при нагревании сопротивление тонкого участка возрастает, что приводит к еще большему выделению тепла и нагреванию. Увеличение сопротивления тонкого участка мало влияет на сопротивление всей нити, и через нить все еще идет большой ток. Все это приводит к перегреву тонкого участка и его сгоранию.

36. Если R – сопротивление всего реостата, а R_V – сопротивление вольтметра, то общее сопротивление на участке ab (рис.17) равно

$$R_{ab} = \frac{R_V \left(\frac{R}{2}\right)}{R_V + R/2} = \frac{R}{2\left(1 + \frac{R}{2R_V}\right)} < \frac{R}{2}.$$

Сопротивление на участке bc остается равным $R/2$. Напряжение, приложенное к реостату, распределится неравномерно. Так как сопротивление участка ab меньше, чем сопротивление bc , то к первому приложено соответственно меньшее напряжение. Чем больше сопротивление вольтметра, тем ближе показания вольтметра к половине приложенного напряжения.

37. Увеличение напряжения вызовет увеличение тока как через проводник, так и через полупроводник, что приведет к увеличению их температуры. В результате сопротивление проводника увеличится, а полупроводника – уменьшится. Поэтому ток через полупроводник увеличится больше, чем пропорционально напряжению, а через проводник – меньше. Таким образом, амперметр,

включенный в цепь полупроводника, покажет ток больший, чем амперметр в цепи проводника (рис.18).

38. До увеличения напряжения источника сопротивления проводника и полупроводника были одинаковы. При увеличении напряжения ток в цепи увеличится, в результате чего увеличатся температуры проводника и полупроводника. При этом уменьшится сопротивление полупроводника и увеличится сопротивление проводника. Напряжение между ними перераспределится, и вольтметр, присоединенный к проводнику, покажет большее напряжение, чем вольтметр, присоединенный к полупроводнику (рис.19).

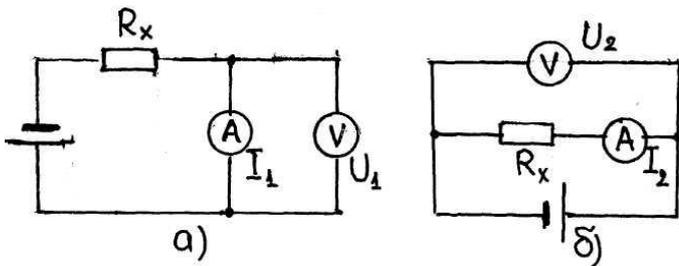


Рис. 31.

39. Для измерения неизвестного сопротивления R_x , имея вольтметр и амперметр с неизвестными сопротивлениями, достаточно сделать два измерения с использованием двух схем (рис.31).

Измерение по первой схеме позволяет определить внутреннее сопротивление амперметра: $r_a = \frac{U_1}{I_1}$,

а по второй схеме величину неизвестного сопротивления $\frac{U_2}{I_2} = R_x + r_a = R_x + \frac{U_1}{I_1}$, отсюда $R_x = \frac{U_2}{I_2} - \frac{U_1}{I_1}$.

40. Ответ зависит от того, какой из приборов лучше. Если мы измеряем сопротивление R_x по первой схеме (рис.20,а), то мы знаем напряжение U на этом сопротивлении, а ток, идущий через него, точно неизвестен. Неточность в измерении тока ΔI при известном напряжении приводит к неточности ΔR_x в определении R_x , которое легко находится из закона Ома:

$$IR_x = U, I\Delta R_x + R_x\Delta I = 0.$$

Обозначив R_V внутреннее сопротивление вольтметра, имеем $\Delta IR_V = IR_x$.

Поэтому $\Delta R_x = R_x \frac{\Delta I}{I} = \frac{R_x}{R_V}$. Для второй схемы (рис.20, б) аналогично получим $\Delta R_x = R_A$, где R_A – внутреннее сопротивление амперметра. Таким образом, если $\frac{R_x}{R_V} < \frac{R_A}{R_x}$, то выгоднее пользоваться первой схемой, и наоборот.

41. При параллельном включении проводников на каждом из них будет одинаковое падение напряжения, но разный ток. При одинаковом напряжении ток будет больше в проводнике с меньшим сопротивлением. Длина и сечение проволок одинаковы, поэтому сопротивление меньше будет у медной проволоки, так как у меди меньше удельное сопротивление (см. «Изменение сопротивления вытягиваемой проволоки»). Ток в медном проводе больше, поэтому и количество тепла в медном проводе будет выделяться больше, чем в железном.

42. После подключения к источнику тока натянутого между опорами провода он начинает нагреваться, его длина и, соответственно, сопротивление увеличивается. Подвешенный на провод груз смещается вниз. Увеличение сопротивления приведет к уменьшению тока, а следовательно, и количества выделяющегося в проводнике тепла. В результате длина провода уменьшается, сопро-

тивление уменьшается, груз смещается вверх, а сила тока увеличивается. Далее все повторяется, и груз начинает колебаться.

43. Теплоотдача растянутой части спирали больше, чем нерастянутой; за счет большей потери тепла происходит охлаждение растянутой части спирали и ее температура будет меньше, чем нерастянутой части. Так как температура растянутой половины спирали будет меньше, то и ее сопротивление будет меньше, чем нерастянутой половины спирали. По спирали идет одинаковый ток, и падение напряжения будет пропорционально сопротивлению, поэтому показания вольтметра, подключенного к нерастянутой половине спирали, будут выше.

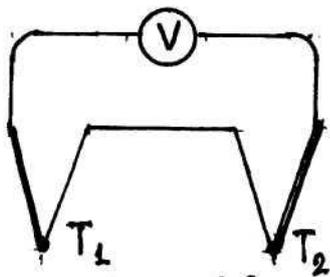


Рис. 32

44. Электрическая цепь, состоящая из двух различных проводников, называется термопарой или термоэлементом. Если контакты (обычно спаи) двух проводящих термоэлементов, образующих термопару, находятся при различных температурах (рис.32), то в цепи термопары возникает ЭДС (термоЭДС), величина которой определяется температурой горячего (например, T_2) и холодного (например, T_1) контактов и природой материалов, применяемых в качестве термоэлектродов. От-

крыл явление термоэлектричества в 1821 году немецкий физик Томас Зеебек (1770-1831). Он изготовил термопару (медь-висмут) и применил ее для измерения температуры. ЭДС термопары из различных металлических проводников лежит в пределах от 5 до 60 мкВ на один градус. С помощью термопары можно измерять температуру от нескольких Кельвин и примерно до 2800 К. Правда, при измерении высоких температур термопара быстро выходит из строя.

Если вдоль проводника существует разность температур, то электроны на горячем конце приобретают более высокие энергии и скорости. В результате возникает поток электронов от горячего конца к холодному, на холодном конце накапливаются отрицательные заряды, а на горячем остается нескомпенсированный положительный заряд. Накопление заряда продолжается до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не вызовет равный обратный поток электронов. Сумма таких разностей потенциалов в цепи создает одну из составляющих термоЭДС, которую называют объемной. Другая составляющая термоЭДС связана с температурной зависимостью контактной разности потенциалов.

Контактная разность потенциалов возникает между разными контактирующими проводниками в условиях термодинамического равновесия. Если два проводника привести в соприкосновение, то между ними происходит обмен электронами. В результате проводники заряжаются (с меньшей работой выхода положительно, а с большей – отрицательно) до тех пор, пока потоки электронов в обоих направлениях не прекратятся. Установившаяся контактная разность потенциалов равна разности работ выхода проводников, отнесенная к заряду электрона.

Работа выхода – это энергия, которую необходимо затратить для удаления электрона из твердого или жидкого вещества. Работа выхода равна разности между минимальной энергией электрона в вакууме и энергией электронов

внутри тела. Электроны поверхностного слоя вылетают за пределы твердого тела и создают над поверхностью электронное облако, внутри тела близко у поверхности возникает нескомпенсированный положительный заряд. Таким образом, в приповерхностной области любого тела образуется двойной электрический слой (своеобразный конденсатор). Для того, чтобы электрон покинул тело, ему необходимо преодолеть разность потенциалов этого двойного слоя, работа, необходимая для этого, и будет работой выхода. Если работы выхода двух контактирующих проводников не совпадают, между их поверхностями возникает контактная разность потенциалов.

Объемная и контактная разности потенциалов определяют термоЭДС термопары, а зависимость термоЭДС от температуры позволяет использовать термопару для измерения температуры.

45. Если спираль электроплитки укоротить, то сопротивление спирали станет меньше, так как уменьшалась ее длина. Напряжение, подаваемое на плитку, не меняется, и поэтому количество тепла, выделяемое спиралью, станет больше $Q = \frac{U^2}{R} t$, где U – напряжение, R – сопротивление на спирали, t – время.

46. Сила ток в цепи согласно закону Ома равна

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r},$$

где \mathcal{E} - ЭДС источника, R – сопротивление внешней цепи, r – внутреннее сопротивление источника тока. Мощность во внешней цепи

$$P = I^2 R = \mathcal{E}^2 \frac{R}{(R+r)^2}.$$

Максимальную мощность находим из условия $\frac{dP}{dR} = 0$:

$$\frac{dP}{dR} = \mathcal{E}^2 \frac{(R+r)^2 - 2 R+r R}{(R+r)^4} = 0.$$

Приравнивая к нулю числитель, получим $R=r$, то есть максимальная мощность будет выделяться во внешней цепи при равенстве внешнего и внутреннего сопротивлений. Равенство сопротивлений означает, что равны мощности:

$$I^2 r = R I^2.$$

Следовательно, коэффициент полезного действия источника равен 0,5.

47. Сила тока максимальна при коротком замыкании, когда внешнее сопротивление равно нулю:

$$I_{max} = \frac{\mathcal{E}}{r}.$$

Таким образом, отношение ЭДС к внутреннему сопротивлению в обоих случаях одинаково.

Максимальная полезная мощность (мощность, выделяющаяся на внешнем сопротивлении) достигается при равенстве внешнего и внутреннего сопротивлений (см. ответ «Максимальная мощность во внешней цепи»), т.е. при токе, равном половине максимального. Эта мощность составляет $P = \frac{\mathcal{E}^2}{4R} = \frac{\mathcal{E}}{4r}$. Так как отношение $\frac{\mathcal{E}}{r}$ одинаково в обоих случаях, то вдвое большая полезная мощность при одинаковых силах тока получается при вдвое большей электродви-

жущей силе \mathcal{E} . При этом внутреннее сопротивление источника также вдвое больше.

48. Нагревание проводника вызовет диффузию электронов в ближайших к АВ участках проводника, вследствие чего потенциал проводника несколько повысится. Текущий ток, приближаясь к точке А, должен преодолеть потенциальный порог. Это потребует дополнительной энергии, которая отнимается у металла. Наоборот, из точки В ток переходит в область более низкого потенциала, и в этом месте выделяется дополнительная энергия, передаваемая металлу. В результате точка с максимумом температуры смещается в направлении протекания тока.

49. Насколько сильно нагревается провод при пропускании по нему электрического тока, зависит от рассеяния тепла в окружающее пространство. Изолированный провод оказывается менее нагретым благодаря тому, что его изоляция обладает меньшим тепловым сопротивлением, чем воздух.

50. Обе формулы тождественны, так как $I = \frac{U}{R}$. При последовательном сопротивлении двух проводников количество теплоты, выделяемое в них, пропорционально их сопротивлениям: $Q = I^2 R t$, так как при одной и той же силе тока количество теплоты будет зависеть от напряжения, а оно больше на проводнике с большим сопротивлением.

При параллельном соединении двух проводников количество теплоты, выделяемое в каждом из них, обратно пропорционально их сопротивлениям, т.е. $Q = \frac{U^2}{R} t$, так как при одном и том же напряжении количество теплоты будет зависеть от силы тока, а она больше у проводника с меньшим сопротивлением.

51. Электропроводность полупроводников определяется концентрацией свободных носителей зарядов; в полупроводниках – это электроны и дырки, которые образуются при разрыве связей между атомами. Для возникновения пары – электрон и дырка – необходимы затраты энергии в виде тепла или другого вида излучения, в том числе и светового излучения. При измерении электропроводности при данной температуре, чтобы исключить дополнительную проводимость, связанную с возникновением электронов и дырок за счет световой энергии, измерения проводят или в темноте, или при очень слабом освещении.

52. В отличие от металлических проводников, у которых при повышении температуры сопротивление увеличивается, в полупроводниках при повышении температуры сопротивление уменьшается из-за увеличения концентрации свободных зарядов. Это свойство полупроводников используется для постепенного увеличения силы тока при пуске электродвигателя. Последовательно включенный полупроводник по мере пропускания тока нагревается, его сопротивление падает, а сила тока постепенно увеличивается.

53. В электронном вакуумном диоде электрический ток представляет собой направленный поток электронов от катода к аноду. Электроны испускаются катодом при его нагревании до высоких температур порядка 2000-2500 К. Этот процесс называется термоэлектронной эмиссией, его можно рассматривать как испарение электронов из металла.

Количество электронов, вылетающих с катода в единицу времени, будет тем больше, чем выше будет температура нагревания катода. При достаточно большом анодном напряжении все электроны, покинувшие катод, достигают анода, и при дальнейшем увеличении напряжения сила тока не изменяется (ток насыщения – прямая линия на рис.23). При повышении температуры катода ток насыщения возрастает, то есть график 1 соответствует низкотемпературному катоду, а график 3 – высокотемпературному.

54. Вакуумная электронная радиолампа с разбитым стеклом в открытом космосе работать будет, так как в космосе вакуум.

55. На внешней границе слоя электронов вблизи катода электрическое поле будет нулевым или близким к нулю. Если бы поле было не близким к нулю, то все электроны с этой границы уходили бы или в сторону анода, или в сторону катода в зависимости от знака поля.

56. Если на рельсы трамвайной линии подать положительный потенциал, то при электролизе грунтовой влаги на рельсах будет выделяться кислород, что приводило бы к преждевременной коррозии рельс.

57. Носители заряда в проводнике способны перемещаться под действием сколь угодно малой силы. Поэтому напряженность электрического поля внутри проводника равна нулю. Если бы в проводнике была напряженность, то на внутренние свободные электроны действовала бы сила, вследствие чего электроны пришли бы в движение и двигались бы до тех пор, пока не заняли бы такое положение, при котором напряженность электрического поля, а стало быть, и действующая на них сила обратилась бы в нуль.

Из этого рассуждения следует: если проводник имеет избыточные заряды, то эти заряды распределяются по внешней поверхности проводника. Этот факт можно объяснить по-другому. Если, например, проводник заряжен отрицательно, то отрицательные заряды отталкиваются друг от друга и перемещаются к поверхности проводника, чтобы расположиться как можно дальше друг от друга. При этом все избыточные заряды распределяются по поверхности с некоторой поверхностной плотностью $\sigma = \Delta q / \Delta S$, где Δq – заряд, ΔS – площадь поверхности, по которой распределен заряд Δq . Плотность распределения зарядов зависит от формы поверхности проводника.

Измерения потенциала φ и поверхностной плотности заряда σ на поверхности проводника переменной формы показывают, что потенциал всех точек поверхности одинаков, а плотность разная. Действительно, потенциал всех точек поверхности одинаковый, так как в противном случае на свободные электроны действовала бы сила и они пришли бы в движение и двигались до тех пор, пока не произошло выравнивание потенциала. Что касается плотности, то она растет с увеличением кривизны. Особенно велика бывает плотность зарядов на остриях. Представим себе шарообразное тело, заряженное до потенциала φ , плотность заряда на нем

$$\sigma = \frac{q}{S} = \frac{q}{4\pi r^2} = \frac{\varphi \varepsilon_0 \cdot 4\pi r}{4\pi r^2} = \frac{\varepsilon_0 \varphi}{r},$$

где r – радиус шара, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Следовательно, чем меньше радиус кривизны, тем больше плотность заряда, то есть наибольшее значение она будет иметь на острие. Напряженность поля вблизи остриев также будет очень большой; она может быть настолько большой, что возникает ионизация молекул воздуха, окружающего проводник. Ионы иного знака, чем q , притягиваются к проводнику и нейтрализуют его заряд. Ионы того же знака, что и q , начинают двигаться от проводника, увлекая с собой нейтральные молекулы воздуха. В результате возникает ощущаемое движение воздуха, называемое электрическим ветром. Заряд проводника уменьшается, он как бы стекает с острия и уносится «ветром».

В металлическом проводнике двигаются свободные электроны, поэтому если мы хотим получить электрический ветер, то есть получить воздушный пробой между двумя электродами в форме диска и острия при меньшей разности потенциалов, то необходимо острие подключать к отрицательному полюсу, а диск – к положительному.

58. Возникновение молний говорит о том, что в грозовых тучах накапливаются значительные электрические заряды. Впрочем (и это важно подчеркнуть), отсутствие молнии еще не означает, что зарядов нет. Во всех видах облаков накапливаются электрические заряды, просто в грозовых тучах их намного больше, чем в других видах облаков.

Прежде всего отметим, что уже в чистой атмосфере, где нет никаких облаков, имеются свободные электрические заряды. При образовании облаков происходит их электризация (накопление зарядов при движении конденсирующихся частиц). Степень электризации облака увеличивается по мере укрупнения частиц, роста размеров облака, усиления осадков из него. Для возникновения молнии необходимы заряды 10-100 Кл, разнесенные друг от друга на расстояние от 1 до 10 км.

Как распределяются заряды в грозовой туче? Верхняя часть тучи заряжена положительно, а нижняя – отрицательно. Центр положительных зарядов находится на высоте 7-10 км, где температура составляет от -20 до -50°C . Центр отрицательных зарядов находится на высоте 3-4 км, где температура равна от 0 до -10°C (рис.33). Нижнюю часть тучи и земную поверхность можно уподобить пластинкам своеобразного конденсатора: верхняя пластинка заряжена отрицательно, а нижняя положительно (земля). Конденсатор разряжается, то есть происходит пробой за счет молнии и за счет осадков. И в том и в другом случаях положительные заряды земли переносятся с поверхности земли в тучу.

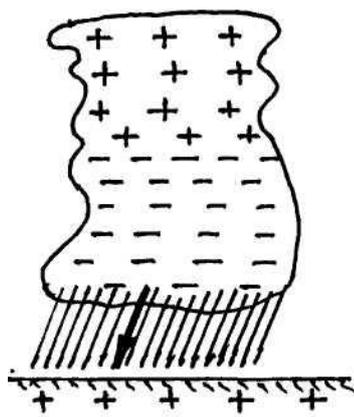


Рис. 33.

Все начинается с того, что в нижней части тучи формируется электрическое поле очень большой напряженности – 10^5 - 10^6 В/м. Свободные электроны получают в таком поле огромные ускорения, направленные вниз, поскольку нижняя часть тучи заряжена отрицательно, а поверхность земли положительно. Двигаясь вниз, электрон приобретает значительную кинетическую энергию, сталкивается с атомами и молекулами, ионизирует их. В результате рождаются новые (вторичные) электроны, которые также ускоряются, за-

тем процесс повторяется и так далее. Возникают целые лавины быстрых электронов, образующие у самого дна тучи плазменные нити – так называемые стимеры. Сливаясь друг с другом, стимеры дают начало плазменному каналу, наполненному электронами и ионами (это так называемый лидер). Канал формируется не плавно, а как бы скачками. Светится лишь нижняя часть лидера, однако движение при разряде происходит так быстро, что мы видим канал светящимся полностью. Лидер двигается по ломаной линии, так как он отклоняется под действием положительного заряда, местами сосредоточенного в воздухе. Если этот заряд достаточно велик, то лидер может даже изменить направление движения на горизонтальное.

Когда лидер подходит к земле, электрическое поле заостренных предметов (отдельно стоящие высокие здания, отдельно стоящие деревья и т.д.) может достичь такой величины, что происходит электрический пробой и навстречу лидеру устремляется положительный заряд. В области, где они встречаются, возникает яркая вспышка, продолжающаяся до тех пор, пока отрицательный лидер не нейтрализуется и электроны не уйдут в землю. Таким образом, по проложенному лидером пути устремляется основной ток, импульс которого длится около 0,1 мс. Сила тока достигает значения порядка 10^5 А. Выделяется значительное количество энергии (до 10^9 Дж). Температура в канале достигает $(1-2) \cdot 10^4$ К. Вот теперь как раз и рождается тот необычно яркий свет, который движется вверх по каналу лидера и достигает облака. Однако наблюдателю из-за неспособности человеческого глаза следить за столь быстрым движением светящимся кажется весь канал. Движение лидера вниз совершается примерно за 20 мс, а обратный путь продолжается всего 100 мкс.

После того, как прошел импульс основного тока, наступает пауза длительностью от 10 до 50 мс. За это время канал практически гаснет, его температура падает примерно до 1000 К, степень ионизации канала существенно уменьшается. Однако в туче еще сохраняется большой заряд, поэтому новый лидер устремляется из тучи к земле, готовя дорогу для нового импульса тока. Новый лидер идет по тому же первоначальному каналу за время около 1 мс. И снова следует мощный импульс основного тока. После очередной паузы все повторяется. В итоге высвечиваются несколько мощных импульсов, которые мы воспринимаем как единый разряд молнии.

59. Мощность молнии в ваттах получим перемножением силы тока на разность потенциалов; при этом потенциал уменьшается от максимального значения до нуля, поэтому потенциал берем средний, то есть половину максимального потенциала. Тогда получаем мощность, равную $P=25 \cdot 10^6 \text{ В} \cdot 10^5 \text{ А} = 2,5 \cdot 10^{12} \text{ Вт} = 2,5$ млрд. киловатт. Получив такую мощность, можно ожидать огромную стоимость молнии. Однако столь большая мощность выделяется за малое время (0,1 мс), и тогда работа молнии равна $E=P \cdot t = 2,5 \cdot 10^8$ Дж или в киловатт-часах ($1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6$) равна $E=70 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.

Если примем цену одного кВт-ч 3 рубля, то получим стоимость молнии всего 210 рублей. Результат получился невероятный.

60. Если дерево влажное (после дождя), ток разряда молнии проходит через воду, и дерево остается невредимым. В сухом дереве ток может пройти в

ствол и по древесному соку уйти в землю. При этом сок может нагреваться, испаряться и, расширяясь, взрывать дерево. Дуб страдает от молнии чаще, чем другие деревья, так как его кора очень неровная. Если молния ударит в дуб в начале грозы, то может оказаться, что намочнуть успевают только верхняя часть дерева, тогда как дерево с гладкой корой быстро становится мокрым сверху до низу. Поэтому при ударе молнии дуб может взорваться, а дерево с гладкой корой – остаться целым.

Лесной пожар возникает в тех случаях, когда в канале молнии (см. «Грозовая туча и молния») происходит несколько разрядов, но в промежутках между основными разрядами в канале продолжает течь ток.

61. Попадая в землю, ток разряда молнии разветвляется и отчасти расходится по поверхности земли от точки удара молнии в землю в виде колец. Если корова стоит в направлении точки попадания молнии в землю, то значительный ток может ответвиться в ее передние ноги и затем выйти из тела через задние ноги – корова пострадает от молнии. Если вас застигнет гроза, не ложитесь на землю: при близком разряде молнии между головой и ногами может возникнуть смертельно опасная разность потенциалов. Поскольку стоять тоже опасно, лучше всего присесть на корточки: так и голова будет низко, и площадь контакта с землей минимальна. При уменьшении площади контакта с землей снижается минимально возможная разность потенциалов между разнесенными участками контакта, так что ответвляющийся в тело ток оказывается минимальным.

62. Высокочастотный ток молнии не проникает вглубь металлического корпуса автомобиля, самолета и т.д., а течет по поверхности. Поэтому, если только молния не попадает в бак с горючим и не вызывает его взрыва, пассажиры вообще могут не заметить разряда молнии.

63. Дать ответ на все вопросы, которые ставит перед нами шаровая молния, пока не представляется возможным. Есть только гипотезы о том, что такое шаровая молния и почему она так себя ведет. Гипотезы будут существовать до тех пор, пока человек не научится получать шаровую молнию искусственно.

Одну из гипотез предложил нобелевский лауреат, русский ученый П.Л. Капица (1894-1984), согласно которой шаровая молния – это некий сгусток плазмы, получающий энергию от внешнего электромагнитного поля. Какие-то электрические явления во время грозы (молния, коронный разряд) создают начальную ионизацию воздуха или пара (если, например, молния попадает в металлический предмет). Ионизированный газ остается относительно плотным сгустком, так как он в целом электрически нейтрален, но сгусток растет до некоторого равновесного размера, поглощая энергию естественного электромагнитного поля. Известно, что такие поля возникают вблизи облаков или поверхности земли во время сильных гроз. Окружающие сгусток предметы препятствуют распространению электромагнитных волн, в результате образуется стоячая волна, и в пучности такой волны сгусток плазмы может черпать энергию. Эта теория привлекательна тем, что в ней предполагается наличие внешнего источника энергии – без такого предположения было бы очень трудно объяснить длительное свечение молнии. Однако такой механизм существования ша-

ровой молнии предполагает наличие очень сильных электромагнитных полей, возникновение и поддержание которых маловероятно.

Интересную и, возможно, более правдоподобную гипотезу существования шаровой молнии предложил в 1974 году И.П. Стаханов. Это – кластерная гипотеза. Кластер – положительный или отрицательный ион, окруженный своеобразной «шубой» из нейтральных полярных молекул, например, молекулами воды. Если ион окружен молекулами воды, его называют гидратированным. Молекулы воды удерживаются около ионов силами электростатического притяжения, такие кластеры мы имеем в растворах электролитов. Такие же гидратированные кластера были найдены в земной атмосфере. Два гидратированных иона разных знаков объединяются в нейтральные пары (рекомбинация). Наличие «шубы» существенно замедляет процессы рекомбинации ионов. Выделяющаяся при рекомбинации энергия преобразуется в энергию светового излучения и частично передается окружающей среде через теплообмен. Когда же число рекомбинаций становится очень большим, выделяющаяся энергия не успевает отводиться от молнии, и тогда происходит взрыв. Следует заметить, что эта гипотеза вполне неплохо объясняет все свойства шаровой молнии. И все-таки это только гипотеза. До тех пор, пока шаровая молния не будет изучена в лабораторных условиях, все гипотезы будут оставаться только гипотезами.

64. При прохождении термоэлектрического тока электроны, покидающие катод, отнимают у него энергию, необходимую для преодоления потенциального барьера на границе металл-вакуум (работы выхода), что приводит к охлаждению катода. Для сохранения температуры катода необходимо увеличивать ток его накала. При запирающем напряжении тока нет, поэтому температура катода будет выше, чем при наличии тока.

65. Знак объемного заряда определяется направлением выпуклой кривой $U(x)$. На участках, обращенных выпуклостью вверх, объемный заряд положительный, на участках, обращенных выпуклостью вниз – отрицательный, на прямолинейных участках объемный заряд отсутствует. Следовательно, вся область между катодом и анодом в первом приближении делится на катодную с избытком положительных зарядов (от точки 0 до точки 1 (рис.24)), фарадеево темное пространство (от точки 1 до точки 2) с отрицательным зарядом и область «положительного столба» (от точки 2 до точки 3), представляющего собой плазму с практически равными концентрациями электронов и положительных ионов и, следовательно, с суммарным зарядом, равным нулю.

66. Плотность тока проводимости определяется по формуле:

$$j = e \cdot n \cdot v \cdot Z,$$

где e – значение (без учета знака) элементарного заряда (заряд электрона), n – концентрация данного вида носителей заряда, v – их средняя направленная скорость, Z – валентность. Для электрона $Z=-1$. Для положительного двухзарядного иона (например, He^{++}) $Z=+2$. Скорости электронов в десятки и сотни раз больше, чем ионов. Поэтому при равенстве концентраций ток электронов значительно больше тока ионов. Так как электроны и ионы движутся в электрическом поле в противоположные стороны, то, считая скорость положительных ионов положительной, скорость электронов следует считать отрицатель-

ной. Поскольку Z для электронов имеет отрицательный знак, знаки плотности ионов и электронов совпадают и прибор, измеряющий силу тока, покажет сумму токов электронов и ионов.

67. В цепи переменного тока на концах любого участка цепи напряжение меняется по абсолютной величине 100 раз в секунду (при частоте 50 Гц) от нуля до максимального значения, называемого амплитудным. Вольтметр электромагнитной системы, подключенный к какому-либо участку, в нашем случае к неоновой лампе, покажет так называемое действующее или эффективное напряжение, которое в $\sqrt{2}=1,41$ раза меньше амплитудного. Следовательно, если вольтметр электромагнитной системы показывает 50 В, это означает, что в отдельные моменты напряжение достигает $50 \cdot 1,41 \approx 70$ В, при котором зажигается лампа на постоянном токе. Поэтому никакого противоречия в опытах нет и напряжение зажигания, как следует из опытов, равно 70 В.

68. Действующее значение переменного тока и напряжения зависит от амплитудных (максимальных) значений этих величин при синусоидальных колебаниях и не зависят от частоты. Поэтому если амплитудные значения силы тока и напряжения одинаковые при разных частотах переменного тока, то действующие значения будут одинаковы.

69. Когда часы находятся в соленоиде, его магнитное поле заставляет стальные детали часов периодически изменять намагниченность, пробегая по

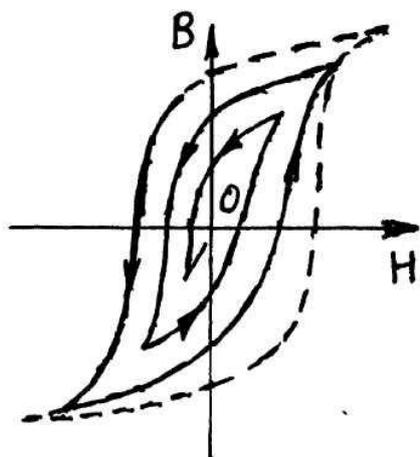


Рис. 34

петле гистерезиса. Во время удаления часов из соленоида напряженность магнитного поля, действующего на часы, постепенно убывает и гистерезисная петля от периода к периоду сужается. За каждую секунду пробегается 50 гистерезисных петель, все более и более узких. Процесс этот схематически показан на рис.34. Когда часы полностью удаляют из магнитного поля, они оказываются практически совершенно размагниченными.

Борисовский Василий Васильевич

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК
(теория и практика)

Учебное пособие для студентов всех технических направлений
очной и заочной форм обучения

Редактор Е.Ф. Изотова

Подписано к печати 30.12.14. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 3,19. Тираж 50 экз. Зак. 141348. Рег. № 203.

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