

ЛЕКЦИЯ 6

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

6.1. Электрический ток. Сила и плотность тока

Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов.

В металлах могут свободно перемещаться только электроны. В проводящих растворах нет свободных электронов, а подвижными заряженными частицами являются ионы. В газах могут существовать в подвижном состоянии и ионы, и электроны.

Упорядоченное движение электрических зарядов, происходящее в проводнике или в вакууме, называется током проводимости (ток в металлах, электролитах, газах).

Упорядоченное движение электрических зарядов, происходящее при движении в пространстве заряженного макроскопического тела, называется конвекционным током.

За направление тока условно принимают направление движения положительных зарядов.

Условия существования тока в проводнике:

1. Наличие в данной среде носителей заряда, которые могли бы перемещаться по проводнику. Обычно это электроны в металлах, электроны и дырки в полупроводниках, ионы в электролитах, ионы и электроны в газах.

2. Наличие внутри проводника электрического поля неэлектростатического происхождения, энергия которого, каким то образом восполняясь, расходовалась бы на перемещение зарядов. Чтобы ток не прекращался, нужен источник электрической энергии – устройство, в котором осуществляется преобразование какого-либо вида энергии в энергию электрического поля.

Основные характеристики электрического тока: для количественной характеристики электрического тока служат две основные величины: сила тока и плотность тока.

Силой тока I в каком либо проводнике называется скалярная физическая величина, определяемая электрическим зарядом dq , проходящим через поперечное сечение S проводника в единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (1)$$

Если сила тока и его направление не изменяются со временем, то такой ток называется постоянным или стационарным.

Для постоянного тока

$$I = \frac{q}{t}, \quad (2)$$

где q – электрический заряд, проходящий за время t через поперечное сечение проводника.

Сила постоянного тока одинакова во всех сечениях проводника.

Единицей силы тока является ампер (А).

Распределение электрического тока по сечению характеризуется вектором плотности тока \vec{j} . *Плотность тока* – это векторная физическая величина, определяемая силой тока, проходящего через единицу площади проводника, перпендикулярного направлению тока.

$$j = \frac{dI}{dS}. \quad (3)$$

Единицей плотности тока является 1 А/м^2 – плотность электрического тока, при которой сила тока, равномерно распределенного по поперечному сечению проводника площадью 1 м^2 , равна 1 А .

Связь плотности тока со скоростью упорядоченного движения зарядов в проводнике. В классической теории электропроводности металлов показывается, что плотность тока в проводнике пропорциональна концентрации n свободных носителей, имеющих заряд $q = e$ и среднюю скорость направленного движения $\vec{v}_{\text{ср}}$, а именно

$$\vec{j} = ne\vec{v}_{\text{ср}}.$$

Выделим внутри проводника площадку $S=1$, расположенную перпендикулярно линиям тока, а значит, и перпендикулярную к направлению скорости $v_{\text{ср}}$ заряженных частиц. Построим на этой площадке цилиндр, с длиной, равной произведению скорости движения частиц на время движения: $(v_{\text{ср}}dt)$ (рис. 6.1). Тогда число частиц N , которые пройдут через площадку S за время dt , будет равно числу частиц, заключенных внутри объема $dV = v_{\text{ср}}Sdt$:

$$N = nV = n\langle v \rangle Sdt.$$

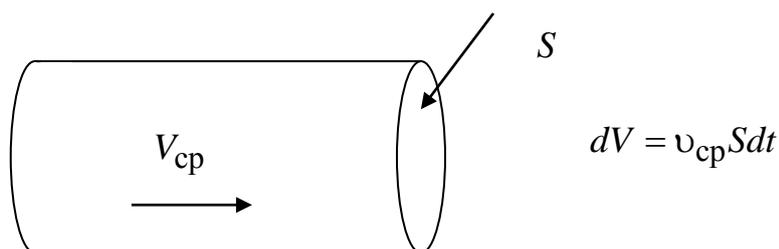


Рис. 6.1

Если n – концентрация носителей тока, e – элементарный заряд носителя тока, то за время dt через поперечное сечение S проводника переносится заряд:

$$dq = Ne = nev_{cp}Sdt. \quad (4)$$

Сила тока:

$$I = \frac{dq}{dt} = nev_{cp}S. \quad (5)$$

Плотность тока:

$$j = \frac{dI}{dS} = nev_{cp}. \quad (6)$$

Плотность тока – это вектор, его направление совпадает с направлением скорости v_{cp} упорядоченного движения носителей тока.

Сила тока I и плотность тока j связаны между собой соотношением: сила тока сквозь произвольную поверхность S определяется как поток вектора \vec{j} , т.е.

$$I = \int_s \vec{j} d\vec{S}, \quad (7)$$

где $d\vec{S} = \vec{n}dS$ (\vec{n} – единичный вектор нормали к площадке dS , составляющий с вектором j угол α).

Плотность постоянного тока одинакова по всему поперечному сечению S однородного проводника, и поэтому

$$I = jS.$$

Отметим, что время установления тока в цепи обратно пропорционально скорости света. Поэтому упорядоченное движение возникает на всем протяжении проводника практически мгновенно, т.е. одновременно с замыканием цепи.

Уравнение непрерывности. Рассмотрим внутри проводника с током какую-либо замкнутую поверхность S и будем понимать под j_n проекцию вектора плотности тока \vec{j} на внешнюю нормаль к элементу поверхности dS . Тогда из определения плотности тока следует, что положительный заряд, уходящий в единицу времени через всю поверхность S наружу, есть

$$\oint_S j_n dS,$$

где интегрирование проводится по всей замкнутой поверхности. Вместе с тем, согласно одному из основных законов электричества, электрические заряды сохраняются: они только перераспределяются между телами (или различными частями тела), но полная сумма возникающих положительных и отрицательных зарядов равна нулю. Поэтому если $\frac{dq}{dt}$ есть изменение за единицу времени положительного заряда, заключенного внутри замкнутой поверхности S , то

$$-\frac{dq}{dt} = \oint_S j_n dS.$$

Это соотношение называется *уравнением непрерывности*.

Можно записать это уравнение в *дифференциальной форме*. Правая часть формулы равна

$$\left(\frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z} \right) d\tau,$$

где $d\tau = dx dy dz$ - объем бесконечно малого параллелепипеда с ребрами, параллельными координатным осям x , y и z .

С другой стороны, если ρ есть объемная плотность заряда, то $q = \rho d\tau$ и мы получаем уравнение непрерывности в дифференциальной форме

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z}.$$

Отметим, что мы используем здесь частных производных, поскольку ρ и \vec{j} могут зависеть как от координат, так и от времени.

Пользуясь понятием дивергенции вектора, уравнение непрерывности можно записать в более компактной форме

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \operatorname{div} \vec{j}.$$

Если токи постоянны, то все физические величины не зависят от времени и в уравнение непрерывности нужно положить $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ равным нулю.

Тогда получается, что поток вектора \vec{j} через любую замкнутую поверхность равен нулю, а, значит, для постоянных токов линии тока непрерывны.

6.2. Сторонние силы. Электродвижущая сила. Напряжение

Сторонние силы. Если в цепи на носители тока действуют только силы электростатического поля, то происходит перемещение носителей заряда (они предполагаются положительными) от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом. Это приводит к выравниванию потенциалов во всех точках цепи и к исчезновению электростатического поля. Поэтому для существования постоянного тока необходимо наличие в цепи источника электродвижущей силы (ЭДС).

Источник ЭДС (источник тока) – устройство, способное создавать и поддерживать в цепи разность потенциалов за счет работы сил неэлектростатического происхождения.

Силы неэлектростатического происхождения, действующие на заряды со стороны источников тока называются *сторонними силами*.

Чтобы поддерживать ток достаточно длительное время, нужно с помощью устройства, называемого источником тока, от конца проводника с меньшим потенциалом непрерывно отводить приносимые сюда током заряды, а к концу с большим потенциалом непрерывно их подводить.

Физическая природа *сторонних сил* может быть различна. Они могут быть обусловлены химическими процессами, диффузией носителей в неоднородной среде или через разницу двух разнородных веществ, электрическими (но не электростатическими) полями, порождаемыми

меняющимися во времени магнитными полями (гальванические элементы, аккумуляторы, термоэлементы, генераторы и т.д.).

Источник ЭДС в электрической цепи играет роль насоса, перекачивающего заряды. Под действием создаваемого поля сторонних сил электрические заряды движутся внутри источника ЭДС против сил электростатического поля, благодаря чему на концах цепи поддерживается разность потенциалов и в цепи течет постоянный электрический ток.

Электродвижущая сила. Для количественной характеристики сторонних сил введено понятие поля сторонних сил. Его характеризуют либо напряженностью поля сторонних сил $\vec{E}_{ст}$, либо работой $A_{ст}$, совершаемой сторонними силами при перемещении зарядов.

Скалярная физическая величина, определяемая работой, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда, называется *электродвижущей силой* (ЭДС) ε , действующей в цепи или на ее участке:

$$\varepsilon = \frac{A_{ст}}{Q_0}. \quad (8)$$

Размерность ЭДС совпадает с размерностью потенциала, измеряясь в вольтах.

Напряженность поля сторонних сил вводят как величину, равную сторонней силе, действующей на единичный положительный заряд:

$$\vec{E}_{ст} = \vec{F}_{ст} / Q_0. \quad (9)$$

Работа сторонних сил $\vec{F}_{ст}$ по перемещению заряда Q_0 на замкнутом участке цепи:

$$A_{ст} = \oint \vec{F}_{ст} d\vec{l} = \oint Q_0 \vec{E}_{ст} d\vec{l}. \quad (10)$$

Тогда ЭДС, действующая в замкнутой цепи,

$$\varepsilon = \oint \vec{E}_{ст} d\vec{l} \quad (11)$$

может быть определена, как *циркуляция вектора напряженности сторонних сил*.

ЭДС на участке 1-2 определяется как:

$$\varepsilon_{12} = \int_1^2 \vec{E}_{cm} d\vec{l}. \quad (12)$$

ЭДС ε_{12} является алгебраической величиной. Если она способствует движению носителей тока в данном направлении, то $\varepsilon_{12} > 0$, если препятствует, $\varepsilon_{12} < 0$.

Напряжение. Кроме сторонних сил, на заряд действуют силы электростатического поля \vec{E} , поэтому результирующая сила, действующая в каждой точке цепи на заряд Q_0 , равна

$$F = F_e + F_{ct} = Q_0(\vec{E} + \vec{E}_{ct}). \quad (13)$$

Работа, совершаемая этой суммарной силой над единичным положительным зарядом на участке цепи 1-2:

$$A_{12} = Q_0 \int_1^2 \vec{E}_e d\vec{l} + Q_0 \int_1^2 \vec{E}_{ct} d\vec{l}. \quad (14)$$

Используя выражения для ЭДС на участке цепи $\varepsilon_{12} = \int_1^2 \vec{E}_{ct} d\vec{l}$ и разности потенциалов на концах участка цепи $\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l}$ можно записать:

$$A_{12} = Q_0(\varphi_1 - \varphi_2) + Q_0\varepsilon. \quad (15)$$

Работа, совершаемая этой суммарной силой над единичным положительным зарядом на участке цепи 1-2, называется падением напряжения или просто напряжением U_{12} на данном участке цепи.

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{Q_0} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}. \quad (16)$$

Напряжение – это физическая величина, определяемая работой, совершаемой суммарным полем электростатических (кулоновских) и сторонних сил при перемещении единичного положительного заряда на данном участке цепи.

Итак, *напряжение на неоднородном участке цепи* (где есть сторонние силы)

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}$$

равно сумме ЭДС источника и разности потенциалов на этом участке.

Для *однородного участка цепи*, где сторонние силы не действуют,

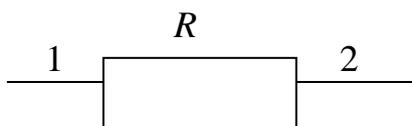
$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (17)$$

т.е. *напряжение совпадает с разностью потенциалов на концах участка цепи*.

Итак, понятие напряжения является обобщением понятия разности потенциалов.

6.3. Закон Ома для однородного участка цепи. Сопротивление проводников

Однородным называется участок цепи, не содержащий источника ЭДС.



Закон Ома для однородного участка цепи: немецкий физик Георг Ом экспериментально установил, что сила тока в цепи прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (18)$$

Сопротивление проводника R – величина, характеризующая сопротивление проводника электрическому току.

Единица сопротивления 1 Ом – сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 В течет постоянный ток 1 А.

Величина $G = 1/R$ – называется *электрической проводимостью*. Проводимость – физическая величина, характеризующая способность участка электрической цепи проводить ток.

Единица проводимости – 1 См (Сименс) – проводимость участка электрической цепи сопротивлением 1 Ом.

Сопротивление проводника зависит от его размеров, формы и материала проводника и от температуры.

Сопротивление однородного линейного проводника цилиндрической формы:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (19)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление, l – длина проводника, S – площадь поперечного сечения.

Удельное электрическое сопротивление ρ служит характеристикой вещества, из которого изготовлен проводник.

Единица измерения удельного сопротивления: $1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное сопротивление проводника площадью поперечного сечения 1 м^2 и длиной 1 м , имеющего сопротивление 1 Ом .

Наименьшим удельным сопротивлением обладает серебро ($1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) и медь ($1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$). На практике наряду с медными, применяются алюминиевые провода. Несмотря на то, что удельное сопротивление алюминия больше, чем у меди, он обладает меньшей плотностью, а значит, весит меньше.

Закон Ома в дифференциальной форме (закон Ома для плотности тока). Закон Ома в форме $I = U/R$ относится ко всему проводнику. Представим закон Ома в дифференциальной (т.е. относящейся к элементу тока длины dl) форме. Некоторая точка внутри проводника характеризуется вектором плотности тока \vec{j} , напряженностью электрического поля \vec{E} и свойствами материала проводника, т.е. удельным сопротивлением ρ . Выделим мысленно малый объем вблизи рассматриваемой точки и подставим $R = \rho \frac{dl}{dS}$ в закон Ома $dI = -\frac{dU}{R}$, получим:

$$dI = -\frac{dU dS}{\rho dl},$$

здесь $U_1 - U_2 = -dU$ – разность потенциалов между сечениями dS отстоящими на расстоянии dl .

Следовательно,

$$\frac{dI}{dS} = -\frac{1}{\rho} \frac{dU}{dl}. \quad (20)$$

Учтем, что $-\frac{dU}{dl} = E$ - напряженность электростатического поля;
 $\frac{dI}{Sd} = j$ - плотность электрического поля; $\frac{1}{\rho} = \gamma$ - удельная электрическая проводимость.

Тогда из формулы (20) следует закон Ома в дифференциальной форме:

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}. \quad (21)$$

Он связывает плотность тока и напряженность поля в какой-либо точке проводника. Закон Ома в дифференциальной форме справедлив и для переменных электрических полей.

Зависимость сопротивления от температуры. Сверхпроводимость.
 Опыт показывает, что изменение удельного сопротивления и сопротивления с температурой описывается линейным законом:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t);$$

$$R = R_0(1 + \alpha t),$$

где ρ и ρ_0 R и R_0 – соответственно удельные сопротивления и сопротивления проводника при данной температуре и 0°C ; α – температурный коэффициент сопротивления: для чистых металлов при не очень низких температурах:

$$\alpha = \frac{1}{273} \text{K}^{-1}.$$

Следовательно, температурная зависимость сопротивления может быть представлена в виде:

$$R = R_0 \alpha T,$$

T – термодинамическая температура.

В большинстве случаев зависимость удельного сопротивления от температуры следует кривой 1, изображенной на рис. 6.2.

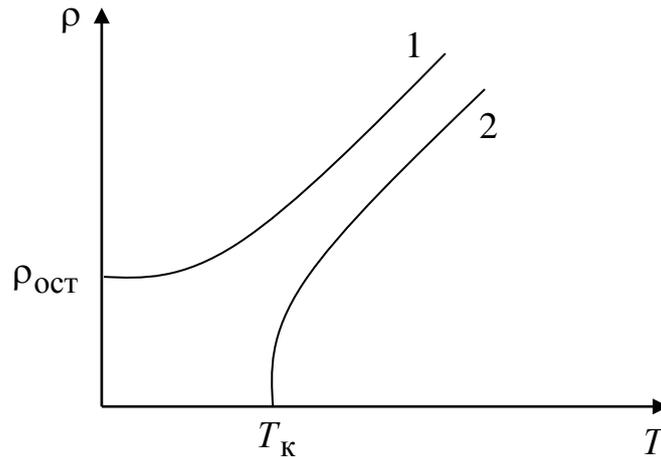


Рис. 6.2

Величина остаточного сопротивления $\rho_{\text{ост}}$ в значительной степени зависит от чистоты материала и наличия остаточных механических напряжений в образце, поэтому после обжига она заметно уменьшается. У абсолютно чистого металла с идеально правильной кристаллической решеткой при абсолютном нуле $\rho = 0$. В металлах сопротивление току определяется лишь подвижностью свободных электронов. А она с увеличением температуры уменьшается из-за возрастания амплитуды колебания атомов кристаллической решетки.

Сверхпроводимость. У большой группы металлов и сплавов при температурах $T_{\text{к}}$ порядка нескольких кельвин, называемых критическими, сопротивление скачком обращается в нуль (кривая 2 на рис. 6.2), т.е. металл становится абсолютным проводником. Это явление, названное *сверхпроводимостью*, было обнаружено в 1911 г. Камерлинг-Оннесом у ртути. В дальнейшем сверхпроводимость была обнаружена у свинца, олова, цинка, алюминия и других металлов, а также у ряда сплавов. Для каждого сверхпроводника имеется своя критическая температура $T_{\text{к}}$, при которой он переходит в сверхпроводящее состояние. При воздействии на сверхпроводник магнитного поля сверхпроводящее состояние нарушается. В настоящее время ведется интенсивный поиск высокотемпературных сверхпроводников, поскольку практическое использование сверхпроводящих материалов затруднено из-за низких критических температур. В частности, обнаружены и активно используются керамические материалы, обладающие сверхпроводимостью при температуре выше 100 К, однако их стоимость пока чрезвычайно высока.

Сверхпроводимость – свойство некоторых проводников, заключающееся в том, что их электрическое сопротивление скачком падает

до 0 (кривая 2 на рис. 6.1) при охлаждении ниже определенной критической температуры T_K , характерной для данного проводника. Материал становится абсолютным проводником. Сверхпроводимость наблюдается при очень низких температурах. Например, для Al $T_K = 1,19$ К; Hg – 4,15 К; Nb – 9,2 К и т.д. В последнее время синтезированы материалы, в которых сверхпроводимость наблюдается при более высоких температурах 110 – 125 К.

Эффект Мейсснера. При охлаждении сверхпроводника, находящегося во внешнем постоянном магнитном поле, в момент перехода в сверхпроводящее состояние магнитное поле полностью вытесняется из его объема. Этим сверхпроводник отличается от идеального проводника, у которого при падении удельного сопротивления до нуля индукция магнитного поля в объеме должна сохраняться без изменения. Явление вытеснения магнитного поля из объема проводника называется эффектом Мейсснера. Он обнаружен в 1933 г. Мейсснером и Оксенфельдом.

Объяснение сверхпроводимости. По своей физической природе сверхпроводимость является сверхтекучей жидкостью, состоящей из электронов. Электроны подчиняются статистике Ферми-Дирака и поэтому не могут «конденсироваться» на низшем энергетическом уровне (принцип Паули) и образовывать сверхтекучую электронную жидкость. Благодаря тепловым колебаниям атомов в узлах кристаллической решетки между электронами может возникнуть сила притяжения и они тогда объединяются в пары (в Кулеровские пары). Пары электронов ведут себя как частицы с целочисленным спином, т.е. они подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна. Они могут конденсироваться и образовывать ток сверхтекучей жидкости – электронных пар, который и образует сверхпроводящий ток.

Возможность образования электронных пар и их сверхтекучести объясняется квантовой теорией.

Полное теоретическое объяснение сверхпроводимости было дано в 1957 г. Дж. Бардиным, Л. Купером и Дж. Шиффером (теория БКШ).

6.4. Работа и мощность тока. Закон Джоуля-Ленца

Работа тока. Пусть к участку цепи приложено напряжение U . За время dt через сечение проводника переносится заряд

$$dQ = Idt.$$

Силы электростатического поля и сторонние силы совершат работу

$$dA = UdQ = UI dt.$$

Используем закон Ома $I = \frac{U}{R}$.

Работа тока:

$$dA = UdQ = UI dt = \frac{U^2}{R} dt = I^2 R dt. \quad (22)$$

Мощность тока:

$$P = dA/dt = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R. \quad (23)$$

В СИ: единица работы – 1 Джоуль; единица мощности – 1 Ватт.

На практике применяют внесистемные единицы работы тока:

$$1 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 3600 \text{ Вт}\cdot\text{с} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 10^3 \text{ Вт}\cdot\text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Закон Джоуля-Ленца в интегральной форм. В случае, когда проводник неподвижен и химических превращений в нем не происходит, работа, совершаемая током, затрачивается на увеличение внутренней энергии проводника, в результате чего он нагревается. Количество теплоты Q , выделяемое в проводнике в соответствии с законом сохранения и превращения энергии, равно работе, совершаемой током:

$$dQ = dA = UI dt = \frac{U^2}{R} dt = I^2 R dt. \quad (24)$$

Выделим в проводнике элементарный цилиндрический объем $dV = dS \cdot dl$, сопротивление которого $R = \rho \frac{dl}{dS}$ (рис. 6.3).

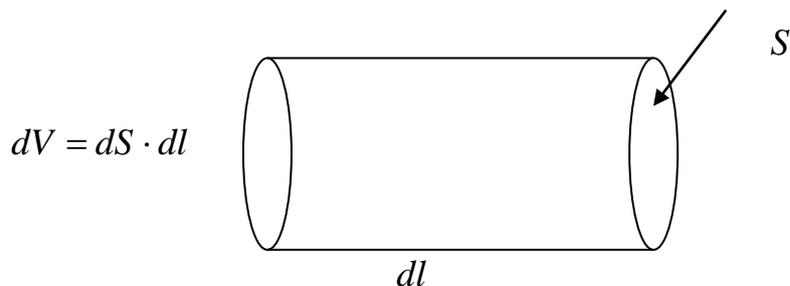


Рис. 6.3

По закону Джоуля-Ленца за время dt в этом объеме выделится теплота

$$dQ = I^2 R dt = \frac{\rho dl}{dS} (j^2 dS^2) dt = \rho j^2 dV dt.$$

Поделим на объем dV и время dt и получим, что *удельная тепловая мощность тока* равна количеству теплоты, выделяющееся за единицу времени в единице объема:

$$P_{\text{уд}} = \frac{dQ}{dV dt} = \rho j^2. \quad (25)$$

Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме. Используем закон Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}$$

и выражение для удельной электрической проводимости

$$\frac{1}{\rho} = \gamma.$$

В результате получим выражение:

$$P_{\text{уд}} = \frac{dQ}{dV dt} = \rho j^2 = \frac{1}{\gamma} \gamma^2 E^2 = \gamma E^2 = jE. \quad (26)$$

Формулы (25) и (26) таким образом – это обобщенное выражение закона Джоуля-Ленца в дифференциальной форме, пригодное для любого проводника.

6.5. Закон Ома для неоднородного участка цепи

Напомним, что *неоднородным* называется участок цепи, на котором действуют сторонние силы, т.е. имеется источник ЭДС (рис. 6.4).

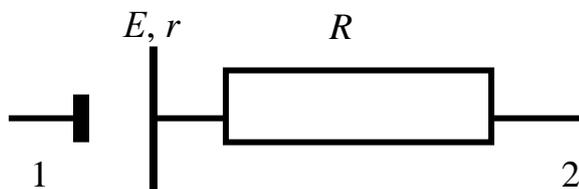


Рис. 6.4

Если ток проходит по неподвижным проводникам, образующим участок 1 – 2, то работа A_{12} всех сил (сторонних и электростатических), совершенных над носителями тока, по закону сохранения и превращения энергии равна теплоте, выделяющейся на участке:

$$A_{12} = Q;$$

$$A_{12} = Q_0(\varphi_1 - \varphi_2) + Q_0\varepsilon_{12} = Q_0((\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{12})$$

$$Q = I^2 R_{12}t = IR_{12}(It) = IR_{12}Q_0,$$

где Q – теплота, выделяемая в проводнике сопротивлением R за время t .

Тогда получаем выражение

$$IR_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{12},$$

из которого следует *обобщенный закон Ома для неоднородного участка цепи*, где $R_{12} = (r + R)$ – сопротивление всей цепи, а r – внутреннее сопротивление источника тока

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{12}}{R_{12}} \quad (27)$$

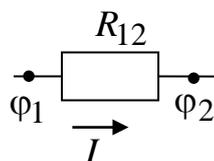
Обобщенный закон Ома в дифференциальной форме: на неоднородном участке цепи под действием электростатического поля E и поля сторонних сил $E_{ст}$ возникает плотность тока

$$\vec{j} = \gamma(\vec{E} + \vec{E}_{ст}). \quad (28)$$

Эта формула – обобщение формулы $j = \gamma E$ для неоднородного участка цепи.

Анализ обобщенного закона Ома.

1. Источник ЭДС в цепи отсутствует: $\varepsilon_{12} = 0$.
- 2.

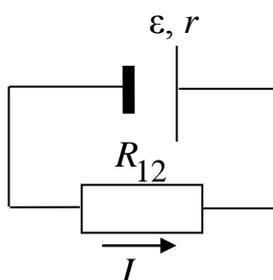


Закон Ома для однородного участка цепи:

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{R_{12}} = \frac{U}{R_{12}},$$

где R_{12} – сопротивление всей цепи

2. Цепь замкнута: $\varphi_1 = \varphi_2$

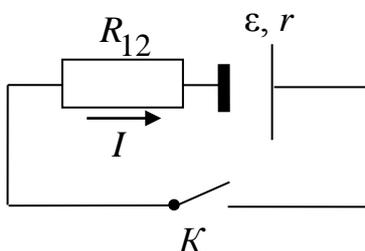


Закон Ома для замкнутой цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{12}},$$

где R_{12} – сопротивление всей цепи.

3. Цепь разомкнута: $I = 0$



$$\varepsilon = \varphi_1 - \varphi_2.$$

ЭДС разомкнутой цепи равна разности потенциалов на ее концах.

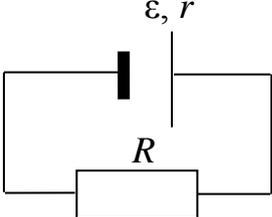
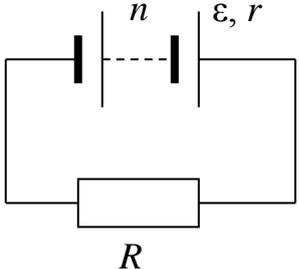
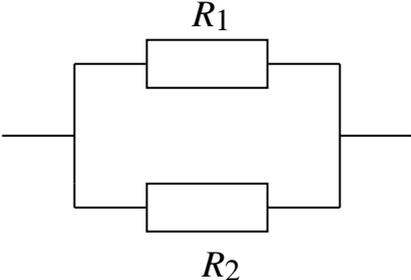
В таблице 1 приведены формулы для напряжения, силы тока и результирующего сопротивления при последовательном и параллельном соединении проводников

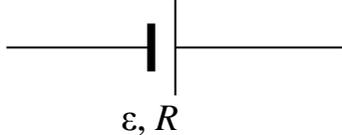
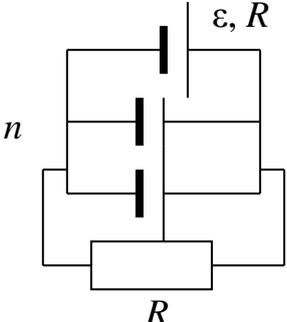
Таблица 1

Соединение	последовательное	параллельное
Сохраняемая величина	$I_1 = I_2 = \dots = I_n = I$ $I = const$	$U_1 = U_2 = \dots = U_n = U$ $U = const$
Суммируемая величина	Напряжение $U = \sum_{i=1}^n U_i$	Сила тока $I = \sum_{i=1}^n I_i$
Результирующее сопротивление	$R = \sum_{i=1}^n R_i$	$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$

В таблице 2 приведен закон Ома для некоторых соединений элементов электрической цепи

Таблица 2

Схема	Закон Ома
	$I = \frac{U_{12}}{R_1 + R_2}$
	$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$
	$I = \frac{n\varepsilon}{R + nr}$
	$I = \frac{U_{12}}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$

 <p style="text-align: center;">ε, R</p>	$I = \frac{\varepsilon + U_{12}}{r}$
 <p style="text-align: center;">R</p>	$I = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{n}}$

6.6. Мощность цепи постоянного тока

Если участок обладает обычным сопротивлением и от прохождения тока нагревается, то, используя закон Ома для участка цепи можно получить для выделяющейся тепловой мощности следующие выражения

$$P = I^2 R; \quad (29)$$

$$P = \frac{U^2}{R}. \quad (30)$$

Какую именно формулу лучше использовать зависит от условия задачи. Если, например, задано напряжение и надо выяснить, как зависит мощность потребителя от его сопротивления, то удобнее использовать формулу (30), из которой сразу ясно, что мощная лампа накаливания – это лампа с малым R , с толстым и коротким волоском. Чтобы увеличить мощность электроплитки, надо укоротить спираль и т.д.

Если же в цепь соединено несколько участков последовательно, задан общий ток и надо выяснить, на каком участке больше выделится тепла, то удобнее использовать формулу (29). Так, больше всего тепла выделится на участке плохого контакта, то есть там, где больше R .

Мощность для всей цепи дается выражением

$$P = \frac{d(q\varepsilon)}{dt} = I\varepsilon. \quad (31)$$

6.7. Правила Кирхгофа для разветвленных цепей

Расчет разветвленных цепей значительно упрощается, если пользоваться не непосредственно обобщенным законом Ома для различных участков цепи, а выведенными на его основе правилами, сформулированными Кирхгофом. Этих правил два. Первое из них относится к узлам цепи.

Узлом называется точка, в которой сходится не менее трех проводников с током. При этом ток, входящий в узел, считается положительным, а выходящий из узла – отрицательным.

Первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_k I_k = 0. \quad (32)$$

Это правило вытекает из закона сохранения электрического заряда. В случае установившегося постоянного тока, ни на каком участке проводника не должны накапливаться электрические заряды. В противном случае токи не могли бы оставаться постоянными.

Это уравнение может быть записано для каждого из N узлов цепи. Однако независимыми из них будут только $N-1$ уравнение.

Второе правило Кирхгофа: в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвленной электрической цепи, алгебраическая сумма произведений сил токов I_i на сопротивления R_i соответствующих участков этого контура равна алгебраической сумме ЭДС ε_k , встречающихся в этом контуре:

$$\sum I_i R_i = \sum_k \varepsilon_k. \quad (33)$$

Такое уравнение может быть составлено для любого замкнутого контура, который может быть мысленно выделен в данной разветвленной цепи. Однако независимыми будут только уравнения для тех контуров, которые нельзя получить наложением других контуров друг на друга.

Число независимых уравнений, составленных в соответствии с первым и вторым правилами Кирхгофа, оказывается равным числу различных токов, текущих в разветвленной цепи. Поэтому, если заданы ЭДС и сопротивления для всех неразветвленных участков, то могут быть вычислены все токи.

При расчете токов удобно пользоваться следующим алгоритмом:

1. выбрать произвольное направление токов на всех участках цепи; действительное направление токов определяется при решении задачи: если искомый ток получился положительным, то направление тока выбрано правильно, если же ток получился отрицательным – его истинное направление противоположно выбранному направлению тока;

2. записать первое правило Кирхгофа для $N-1$ узла из всех N узлов цепи;

3. выделить замкнутые контуры так, чтобы каждый новый контур содержал хотя бы один участок цепи, не входящий в ранее рассмотренные контуры, и выбрать для каждого контура направление обхода;

4. составить уравнение для каждого контура, учитывая, что произведение IR положительно, если ток на данном участке совпадает с направлением обхода, и наоборот, ЭДС, действующие по выбранному направлению обхода, считаются положительными, против – отрицательными. Общее число уравнений должно быть равно числу искомых величин. В разветвленной цепи, состоящей из P ветвей (участников цепи между соседними узлами) и N узлов число независимых уравнений (30) равно $P - N + 1$;

5. решить полученную систему уравнений.

6.8. Элементарная классическая теория электропроводности металлов

Носителями тока в металлах являются свободные электроны, т.е. электроны слабо связанные с ионами кристаллической решетки металла. Это представление о носителях тока в металлах основывается на электронной теории проводимости металлов, созданной немецким физиком П. Друде и разработанной нидерландским физиком Х. Лоренцем.

Существование свободных электронов в металлах можно объяснить следующим образом: при образовании кристаллической решетки металлов валентные электроны, сравнительно слабо связанные с атомными ядрами отрываются от атомов металла, становятся «свободными» и могут перемещаться по всему объему, образуя своеобразный электронный газ, обладающий, согласно электронной теории металлов, свойствами идеального газа.

Электроны проводимости при своем движении сталкиваются с ионами решетки, в результате чего устанавливается термодинамическое равновесие между электронным газом и решеткой. По теории Друде-Лоренца, электроны обладают такой же энергией теплового движения, как и молекулы

одноатомного газа. Тепловое движение электронов, являясь хаотическим, не может привести к возникновению тока. При наложении внешнего электрического поля на металлический проводник, кроме теплового движения электронов, происходит их упорядоченное движение – возникает электрический ток. Электрический ток возникает в цепи практически одновременно с ее замыканием, поскольку замыкание электрической цепи влечет за собой распространение электрического поля со скоростью света. ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

Классической теории электропроводности при малой концентрации электронов проводимости и высокой температуре дает правильные качественные результаты и является простой и наглядной. Однако, имеются расхождения теории с опытом, которые объясняются тем, что движение электронов в металлах подчиняются не законам классической механики, а законам квантовой механики и, следовательно, поведение электронов проводимости надо описывать не статистикой Максвелла-Больцмана, а квантовой статистикой. Поэтому объяснить затруднения элементарной классической теории электропроводности металлов можно лишь квантовой теорией, которая будет рассмотрена в дальнейшем.

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим током и каковы условия возникновения тока проводимости? Что принимают за направление тока?
2. Что называется силой и плотностью тока? В каких единицах они измеряются?
3. Какие силы называются электростатическими (кулоновскими)? Сторонними?
4. Каков физический смысл разности потенциалов, электродвижущей силы и напряжения на участке цепи? Что такое электродвижущая сила (ЭДС) источника тока?
5. Запишите и сформулируйте закон Ома для участка цепи и для замкнутой цепи.
6. Запишите и сформулируйте правила Кирхгофа. Сформулируйте правила для токов и ЭДС при применении правил Кирхгофа.
7. Запишите и сформулируйте закон Ома и закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме.
8. Как сопротивление зависит от линейных размеров проводника? Что такое удельное сопротивление и удельная проводимость проводника? В каких единицах они измеряются?

9. Как зависит сопротивление металлов от температуры? В чем состоит явление сверхпроводимости?

10. Как элементарная классическая теория объясняет электропроводность металлов?