

1.3. Законы постоянного тока

Справочные сведения

Связь между током и зарядом:

$$\bar{I} = \frac{d\bar{q}}{dt},$$

где $d\bar{q}$ — заряд, переносимый через сечение проводника,
 dt — время прохождения заряда.

Плотность тока:

$$\bar{j} = \frac{d\bar{I}}{dS}.$$

Закон Ома в дифференциальной форме описывает процесс в каждой точке проводника:

$$\bar{j} = \gamma \bar{E},$$

где γ — удельная проводимость проводника.

Закон Ома в интегральной форме для участка цепи, не содержащего ЭДС:

$$I = \frac{U}{R} = GU,$$

где R — сопротивление участка,

G — проводимость.

Сопротивление проводника:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\gamma S}$$

(здесь ρ — удельное сопротивление вещества проводника,
 γ — удельная проводимость).

Закон Джоуля — Ленца (мощность, потребляемая на участке цепи):

$$N = I^2 R.$$

Если других эффектов, кроме нагревания проводников, не возникает, то мощность может быть выражена формулой:

$$N = IU = \frac{U^2}{R}.$$

Соединение проводников: при последовательном соединении общее сопротивление

$$R_{\text{ис}} = \sum R_i;$$

при параллельном соединении общее сопротивление определяется из формулы

$$\frac{1}{R_{\text{ип}}} = \sum \frac{1}{R_i}.$$

Зависимость удельного сопротивления проводников от температуры выражается формулой

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

где ρ_0 — удельное сопротивление при 0°C , α — температурный коэффициент сопротивления (для металлов $\alpha \approx 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, для электролитов и полупроводников температурный коэффициент α отрицателен).

Для поддержания тока в цепи необходимо наличие сторонних сил, причем циркуляция вектора напряженности сторонних сил

$$\oint \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l} \neq 0.$$

Закон Ома для участка цепи, содержащего источник сторонних сил:

$$I = \frac{U + E_{\text{ст}}}{R + r}.$$

$E_{\text{ст}} > 0$, если источник способствует протеканию тока по данному участку, и $E_{\text{ст}} < 0$, если он препятствует протеканию тока.

Разветвленные цепи рассчитывают по правилам Кирхгофа:

1) для узла $\sum I_i = 0$;

2) для произвольного замкнутого контура

$$\sum E_k = \sum I_i R_i + \sum I_k r_k.$$

Заряд конденсатора в процессе его зарядки (разрядки) изменяется на величину

$$\Delta q = CE \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \text{ (зарядка).}$$

$$\Delta q = CE \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \text{ (разрядка),}$$

где $\tau = RC$ — время релаксации;

R — сопротивление, через которое происходит зарядка (разрядка) конденсатора.

Примеры решения задач

При решении задач настоящего параграфа следует выделить два метода: 1) для определения характеристик электрической цепи: силы тока, напряжения и сопротивления используют обобщенный закон Ома. 2) для расчета разветвленных цепей используют законы Кирхгофа. Независимо от выбранного метода желательно придерживаться следующего порядка: 1) обозначить токи на всех участках цепи. 2) выбрать направления обхода, составить уравнения на основании второго закона Кирхгофа, обобщенного закона Ома, соблюдая правило знаков. В задачах на тепловое действие тока используют закон Джоуля-Ленца и закон сохранения энергии.

Задача 1. Какое количество электричества было перенесено, если ток равномерно возрастал от нуля до 3 А в течение 10 с?

Решение.

Заряд, перенесенный за время dt , и ток связаны формулой $dq = idt$.

В нашем случае ток не остается постоянным, а нарастает равномерно, т. е.

$$i = kt,$$

где $k = \frac{I}{\tau}$ постоянная величина.

Тогда $dq = ktdt$

$$q = \int_0^{\tau} ktdt = \frac{1}{2} k\tau^2.$$

Подстановка числовых данных дает: $q = 15$ Кл.

Задача 2. Определите температурный коэффициент провода, составленного из алюминиевой проволоки сопротивлением 3 Ом и железной проволоки сопротивлением 2 Ом, соединенных последовательно.

Решение.

Выразим сопротивления алюминиевой и железной проволок для одной и той же температуры:

$$R_1 = R_{01} (1 + a_1 t),$$

$$R_2 = R_{02} (1 + a_2 t).$$

Найдем изменение сопротивления алюминиевой проволоки $\Delta R_1 = R_{01}a_1t$ и железной проволоки $\Delta R_2 = R_{02}a_2t$. Проволоки соединены последовательно, поэтому увеличение полного сопротивления при изменении температуры на $t^\circ\text{C}$ равно:

$$\Delta R = a(R_{01} + R_{02})t.$$

Но, с другой стороны, $\Delta R = \Delta R_1 + \Delta R_2$. Следовательно, температурный коэффициент a может быть определен из соотношения

$$a(R_{01} + R_{02})t = a_1R_{01}t + a_2R_{02}t$$

$$a = \frac{a_1R_{01} + a_2R_{02}}{R_{01} + R_{02}}.$$

Подстановка числовых данных дает: $a = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Задача 3. В неограниченной среде, удельное сопротивление которой $\rho = 10^2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, находится металлический шар диаметром $D = 0,1 \text{ м}$. Определите сопротивление системы шар — неограниченная среда.

Решение.

Сопротивление сферического слоя радиусом x и толщиной dx равно:

$$dR = \rho \frac{dx}{4\pi x^2}.$$

Полное сопротивление системы шар — неограниченная среда:

$$R = \int dR = \frac{\rho}{4\pi} \int_{\frac{D}{2}}^{\infty} \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{2\pi D}.$$

Подстановка числовых данных дает: $R = 1,5 \cdot 10^2 \text{ Ом}$.

Задача 4. В схеме (рис. 3.1.1) сопротивления подобраны так, что ток через батарею с ЭДС E_1 не идет. $E_1 = 2 \text{ В}$, $E_2 = 5 \text{ В}$; $R_3 = 2 \text{ Ом}$. Внутренними сопротивлениями источников можно пренебречь. Определите: а) напряжение U_2 на сопротивлении R_2 ; б) ток в сопротивлении R_3 , в) сопротивления R_1, R_2, R_3

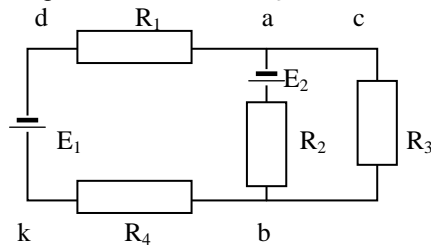


Рис. 3.1.1

Решение

По условию задачи ток через источник E_1 не идет, следовательно, ток в контуре ABC везде один и тот же: $I_3 = I_2 = I$ (первое правило Кирхгофа).

$$\text{Но } I = \frac{E_1}{R_2 + R_3}$$

или
$$I = \frac{E_1}{R_3}.$$

Используя второе правило Кирхгофа для контура $ABKO$, получаем:

$$IR_2 = E_2 - E_1;$$

следовательно,

$$U_2 = E_2 - E_1;$$

Сопротивление R_2 может быть рассчитано по закону Ома для участка цепи:

$$R_2 = \frac{U_2}{I}.$$

Сопротивления R_1 и R_4 (так как ток через них не идет) могут быть какими угодно.

Подстановка числовых данных дает:

$$U_2 = 3 \text{ В}; \quad I_3 = IA; \quad R_2 = 3 \text{ Ом}.$$

Задача 5. К концам свинцовой проволоки длиной $l = 5$ см и диаметром $d = 0,2$ мм приложено напряжение $U = 100$ В. Какой промежуток времени пройдет до начала плавления проволоки? Точка плавления свинца $t_{пл} = 327$ °С. Начальную температуру проволоки принять равной нулю. Изменением теплоемкости свинца при нагревании и рассеиванием тепла в окружающее пространство пренебречь.

Решение

В общем случае элементарное количество тепла, выделяемое электрическим током в проволоке за время $d\tau$, равно:

$$dQ = \frac{U^2}{R} d\tau. \quad (1.3.1)$$

Сопротивление R меняется с температурой по закону:

$$R = \rho_0(1 + \alpha t) \frac{l}{S}, \quad (1.3.2)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при 0°C , а t — температура в данный момент.

В то же время количество тепла, получаемое проволокой, можно выразить через массу проволоки, ее удельную теплоемкость и изменение температуры:

$$DQ = c m dt = c D l S dt, \quad (1.3.3)$$

Подставив (1.3.2) и (1.3.3) в уравнение (1.3.1), получим:

$$\frac{U^2 S}{\rho_0 (1 + \alpha t)} d\tau = D l S c dt. \quad (1.3.4)$$

Разделим переменные и проинтегрируем:

$$d\tau = \frac{D l^2 c \rho_0}{U^2} (1 + \alpha t) dt.$$

$$\tau = \frac{D l^2 c \rho_0}{U^2} \left(t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \right) \Big|_{t_0}^{t_{nl}}.$$

Так как $t_0 = 0^\circ\text{C}$, то после подстановки пределов интегрирования получаем:

$$\tau = \frac{D l^2 c \rho_0}{U^2} t_{nl} \left(1 + \frac{1}{2} \alpha t_{nl} \right).$$

Произведем расчет: $\tau = 5 \cdot 10^{-5} \text{с}$.

Задача 6. Аккумуляторная батарея из 120 элементов емкостью 360 А·ч может заряжаться в течение 8 ч. Для зарядки аккумуляторы включают в четыре параллельные группы. Зарядку производят от сети с напряжением 220 В. Электродвижущая сила каждого аккумулятора, в начале зарядки равная 1,8 В, после зарядки должна быть равна 2,7 В. Внутреннее сопротивление каждого аккумулятора можно считать постоянным и равным 0,1 Ом. Какой реостат следует включить в схему для осуществления зарядки при этих условиях?

Решение.

Чтобы выбрать реостат для включения в схему, надо рассчитать ток, который будет по нему проходить, и его сопротивление.

Ток, обеспечивающий зарядку, и, следовательно, проходящий через реостат, равен:

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

В каждой параллельной ветви последовательно включено $\frac{n}{4}$ элементов. Электродвижущая сила в одной ветви будет определять ЭДС всей батареи.

В начале зарядки ЭДС всей батареи

$$E' = \frac{n}{4} E_1.$$

В конце зарядки ЭДС всей батареи

$$E'' = \frac{n}{4} E_2.$$

Сопротивление всей батареи

$$r' = \frac{r \frac{n}{4}}{4} = \frac{m}{16}.$$

В соответствии со вторым правилом Кирхгофа начало и конец зарядки описываются уравнениями:

$$U - E' = I(R' + r'), \quad U - E'' = I(R'' + r').$$

Откуда получаем:

$$R' = \frac{U - \frac{n}{4} E_1 - Ir'}{I},$$

$$R'' = \frac{U - \frac{n}{4} E_2 - Ir'}{I}.$$

Вычисления дают:

$$I = 45 \text{ A};$$

$$R' = 2,94 \text{ Ом}; \quad R'' = 2,34 \text{ Ом}.$$

Для осуществления зарядки аккумуляторов следует взять реостат сопротивлением не менее 3 Ом, выдерживающий ток 45 А.

Задача 7. Четыре батареи с электродвижущими силами $E_1 = 55 \text{ В}$, $E_2 = 10 \text{ В}$, $E_3 = 30 \text{ В}$, $E_4 = 15 \text{ В}$ и внутренними сопротивлениями $r_1 = 0,3 \text{ Ом}$, $r_2 = 0,4 \text{ Ом}$, $r_3 = 0,1 \text{ Ом}$, $r_4 = 0,2 \text{ Ом}$ включены в цепь (рис. 3.1.2)

$R_1 = 9,5 \text{ Ом}$, $R_2 = 19,6 \text{ Ом}$, $R_3 = 4,9 \text{ Ом}$. Найдите токи в каждой ветви цепи.

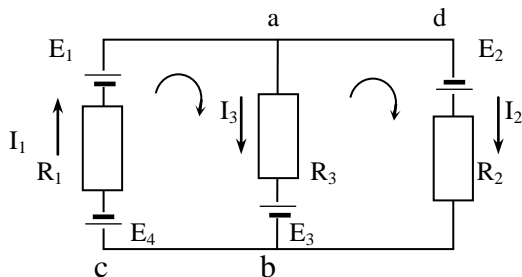


Рис. 3.1.2

Решение.

В схеме неизвестных токов три, следовательно, необходимо составить систему из трех независимых уравнений.

Два уравнения мы получим, применяя второе правило Кирхгофа (так как независимых контуров два — $abca$ и $adba$), а третье уравнение даст первое правило Кирхгофа.

Покажем на схеме направления токов и направление обхода контуров.

Составляем уравнения. При составлении уравнений будем считать ЭДС или направление тока положительными (пишем в уравнении со знаком «плюс»), если направление ЭДС или направление тока совпадает с направлением обхода контура (для второго правила Кирхгофа); ток отрицательным (берем в уравнении первого правила Кирхгофа со знаком «минус»), если он подходит к узловой точке.

Для контура $abca$ (рис. 3.1.2):

$$E_1 - E_3 - E_4 = I_1 (R_1 + r_1 + r_4) + \frac{1}{3} (R_3 + r_3);$$

для контура $adba$:

$$E_3 + E_2 = \frac{1}{2} (R_2 + r_2) - \frac{1}{3} (R_3 + r_3);$$

для узловой точки a :

$$-I_1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} = 0.$$

Полученную систему уравнений заменим системой уравнений с числовыми коэффициентами:

$$0 = -I_1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3};$$

$$10 = 10I_1 + 5I_3;$$

$$40 = 20\frac{1}{2} - 5I_3.$$

Систему можно решать любым из известных в математике способом, но использование определителей быстрее приводит к цели.

В результате решения получаем:

$$I_1 = 1,28 \text{ A}; I_2 = 1,85 \text{ A}; I_3 = -0,57 \text{ A}.$$

Знак «минус» перед током I_3 показывает, что истинный ток в ветви имеет противоположное направление.

Задача 8. От источника, разность потенциалов на клеммах которого $U_0 = 10^5$ В, требуется передать мощность $N = 5 \cdot 10^3$ кВт на расстояние $l = 5$ км. Допустимая «потеря» напряжения в проводах $n = 1\%$. Рассчитайте минимальное сечение S медного провода, пригодного для этой цели.

Решение.

Обозначим ; U_0 — разность потенциалов на клеммах источника, R_n — нагрузка потребителя, U_R — напряжение на нагрузке.

Напряжение U_0 , снимаемое с клемм источника, частично падает на проводах и частично подается потребителю:

$$U_0 - nU_0 + U_R.$$

Ток на нагрузке R_n и в проводах один и тот же, так как R_n и провода соединены последовательно. Он может быть определен из соотношения:

$$N = IU_0; I = \frac{N}{U_0}. \quad (1.3.5)$$

«Потерю напряжения» в проводах можно найти по закону Ома для участка цепи:

$$U_1 = IR,$$

где R — сопротивление проводки.

По условию задачи «падение напряжения» в проводах составляет n процентов от напряжения, даваемого источником, т. е.

$$U_1 = nU_0 \text{ и } nU_0 = IR, \quad (1.3.6)$$

Сопротивление проводов R может быть выражено через длину и сечение одного провода:

$$R = \rho \frac{2l}{S} \quad (1.3.7)$$

(длина равна $2l$, так как для передачи мощности на расстояние l используются два провода).

Подставив соотношения (1.3.5) и (1.3.7) в (1.3.6), получим:

$$nU_0 = \frac{N}{U_0} \rho \frac{2l}{S},$$

откуда

$$S = \frac{N\rho 2l}{nU_0^2}.$$

Произведем расчет: $S = 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Задача 8. С каким коэффициентом полезного действия работает свинцовый аккумулятор, ЭДС которого $E = 2,15$ В, если во внешней

цепи с сопротивлением $R = 0,25 \text{ Ом}$ идет ток $I = 5 \text{ А}$? Какую максимальную полезную мощность может дать аккумулятор во внешней цепи? Как при этом изменится его КПД?

Решение.

По определению коэффициент полезного действия η есть отношение полезной мощности ко всей мощности, выделяемой аккумулятором:

$$\eta = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E} = \frac{E - Ir}{E}, \quad (1.3.8)$$

где U — разность потенциалов на полюсах батареи.

Максимальную полезную мощность (мощность, выделяемую на внешнем сопротивлении) источник дает в том случае, когда его внутреннее сопротивление r равно сопротивлению внешнего участка R_1 :

$$R_1 = r = \frac{U}{I} = \frac{E - Ir}{I} \quad (1.3.9)$$

При таком сопротивлении ток в цепи равен:

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + r} = \frac{E}{2r}, \quad (1.3.10)$$

Следовательно,

$$N_{\text{макс}} = I_1 U_1 = I_1 (E - I_1 r),$$

Используя уравнения (1.3.9) и (1.3.10), получаем:

$$N_{\text{макс}} = \frac{E^2}{4r} = \frac{E^2 I}{4(E - IR)} \quad (1.3.11)$$

При этом коэффициент полезного действия

$$\eta' = \frac{E - Ir}{E} = \frac{E - \frac{E}{2}}{E}.$$

Результаты расчета: $\eta = 42\%$; $N_{\text{макс}} = 6,45 \text{ Вт}$; $\eta' = 50\%$.

Индивидуальные задания

1.3.1. Имеются два одинаковых элемента с ЭДС $\varepsilon = 2\text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 0,3\text{ Ом}$. Как надо соединить эти элементы (последовательно или параллельно), чтобы получить больший ток, если внешнее сопротивление: 1) $R = 0,2\text{ Ом}$; 2) $R = 16\text{ Ом}$? Найти ток I в каждом случае.

$$\text{Ответ: } I_1 = \frac{2\varepsilon}{R+r}; I_1 = 2,1\text{ А}; I_2 = \frac{\varepsilon}{R+0,5r}; I_2 = 0,12\text{ А}$$

1.3.2. Даны два элемента с ЭДС $\varepsilon = 1,5\text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 0,2\text{ Ом}$. Как нужно соединить эти элементы, чтобы получить от собранной батареи наибольшую силу тока во внешней цепи, имеющей сопротивление $R = 0,2\text{ Ом}$? Определить максимальную

силу тока. Ответ: $I_1 = \frac{\varepsilon}{r}; I_1 = 7,5\text{ А}; I_2 = \frac{2\varepsilon}{r}; I_2 = 15\text{ А}$.

1.3.3. Определите суммарный импульс электронов в прямом проводе длиной $l = 500\text{ м}$, по которому течет ток $I = 20\text{ А}$.

$$\text{Ответ: } P = \frac{mI l}{e}; P = 5,7 \cdot 10^{-8}\text{ кг}\cdot\text{м}/\text{с}$$

1.3.4. Два последовательно соединенных элемента с одинаковыми ЭДС $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2\text{ В}$ и внутренними сопротивлениями $r_1 = 1\text{ Ом}$ и $r_2 = 1,5\text{ Ом}$ замкнуты на внешнее сопротивление $R = 0,5\text{ Ом}$. Найти разность потенциалов на зажимах каждого элемента.

$$\text{Ответ: } I = \frac{2\varepsilon}{R+r_1+r_2} = 1,3\text{ А}; U_2 = \varepsilon - I r_1 = 0,6\text{ В}$$

1.3.5. Вольтметр, включенный в сеть последовательно с сопротивлением R_1 , показал напряжение $U_1 = 198\text{ В}$, а при включении последовательно с сопротивлением $R_2 = 2R_1$ показал $U_2 = 180\text{ В}$. Определите сопротивление R_1 и напряжение в сети, если сопротивление вольтметра $r = 900\text{ Ом}$.

Ответ: $R_1 = \frac{U_1 - U_2}{2U_2 - U_1}$; $R_1 = 100 \text{ Ом}$; $U = U_1 \left(\frac{R_1}{R} + 1 \right)$; $U = 20 \text{ В}$

1.3.6. Сопротивления резисторов R_1 и R_2 и ЭДС ε_1 и ε_2 источников тока в схеме на рисунке известны. При какой ЭДС ε_3 ток через резистор R_3 не течет.

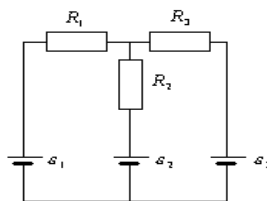


Рис.3.1.3

1.3.7. Сила тока в проводнике сопротивлением $R = 120 \text{ Ом}$ равномерно возрастает от $I_0 = 0$ до $I_{max} = 5 \text{ А}$ за время $t = 15 \text{ с}$. Определите количество Q , выделившееся за это время в проводнике.

Ответ: $Q = \frac{1}{3} R^2 R t^3$; $Q = 15 \text{ кДж}$

1.3.8. Приборы соединены по схеме, показанной на рисунке 3.1.4. Сопротивления вольтметров V_1 и V_2 очень велики. Как будут меняться показания вольтметров при изменении сопротивления R_2 от 0 до ∞ ? Ответ: при $R_2 \rightarrow 0$; $U_1 = U$; $U_2 = 0$; при $R_2 \rightarrow \infty$; $U_1 = 0$; $U_2 = U$.

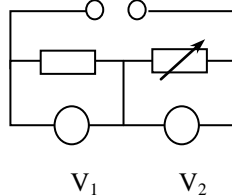


Рис. 3.1.4

Ответ: при $R_2 \rightarrow 0$; $U_1 = U$; $U_2 = 0$; при $R_2 \rightarrow \infty$; $U_1 = 0$; $U_2 = U$.

1.3.9. Чему равно общее сопротивление цепи между точками A и B (рис. 3.1.5)? Ответ: $R = \frac{7}{5} r$

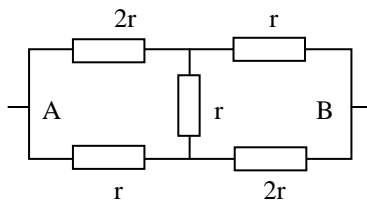


Рис. 3.1.5

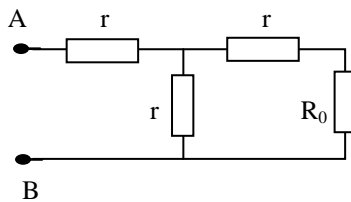


Рис. 3.1.6

1.3.10. Какими должны быть сопротивления r (рис.3.1.6), чтобы входное сопротивление между зажимами A и B было равно R_0 ?

Сопротивление R_0 считать известным. Ответ: $r = \frac{R_0}{\sqrt{3}}$

1.3.11. Проводник из вещества с удельным сопротивлением ρ имеет форму прямого усеченного конуса, высота которого h , а радиусы верхнего и нижнего оснований R_1 и R_2 ($R_1 < R_2$). Определите сопротивление этого проводника между его основаниями.

Ответ: $R = \frac{\rho h}{\pi R_1 R_2}$

1.3.12. Определите сопротивление мотка медной проволоки сечением. $S = 0,1 \text{ мм}^2$, масса мотка $m = 0,3 \text{ кг}$. Ответ: $R = 57 \text{ Ом}$

1.3.13. Как изменится сопротивление медной проволоки длиной l , если ее растянуть на 0,1%? Ответ: 0,17%

1.3.14. Из никелиновой ленты толщиной 0,2 мм и шириной 3 мм нужно изготовить реостат на 2,5 Ом. Какой длины нужно взять ленту и какое максимальное напряжение можно подать на этот реостат, если допустимая плотность тока для никелина $j = 0,2 \text{ А/мм}^2$? Ответ: $l = 3,75 \text{ м}$

1.3.15. Какое количество электричества переносится, если ток убывает от 18 А до нуля, причем за каждые 0,01 с он убывает вдвое?

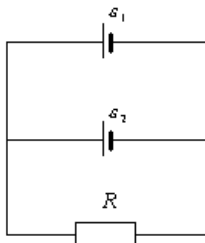
Ответ: $q = 0,26 \text{ Кл}$

1.3.16 В плоский конденсатор, расстояние между пластинами которого равно $d = 5 \text{ мм}$, вдвигают стеклянную пластинку ($\epsilon = 7$) с постоянной скоростью $v = 50 \text{ мм/с}$. Напряжение источника, заряжающего конденсатор $U = 220 \text{ В}$, ширина пластины $b = 4,5 \text{ мм}$. Определить силу тока, текущего в цепи придвижении пластины.

Ответ: $I = \frac{6\epsilon_0 S U V}{d}$; $I = 0,13 \text{ мкА}$

1.3.17. Два параллельно соединенных элемента с одинаковыми ЭДС $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 2 \text{ В}$ и внутренними сопротивлениями $r_1 = 1 \text{ Ом}$ и $r_2 = 1,5 \text{ Ом}$ замкнуты на внешнее сопротивление $R = 1,4 \text{ Ом}$. Найти ток I в каждом из элементов и во всей цепи. Ответ:

$I = \frac{\epsilon}{R + r}$; $I = 1 \text{ А}$; $I_1 = \frac{J r_1}{r_1 + r_2}$; $I_1 = 0,4 \text{ А}$; $I_2 = 0,6 \text{ А}$.



1.3.18. К элементу с ЭДС $\varepsilon = 1,5 \text{ В}$ присоединили катушку с сопротивлением $R = 0,1 \text{ Ом}$. Амперметр показал силу тока, равную $I_1 = 0,5 \text{ А}$. Когда к элементу присоединили последовательно еще один элемент с такой же ЭДС, то сила тока в той же катушке оказалась $I_2 = 0,4 \text{ А}$. Определить внутреннее сопротивление первого и второго

элементов. Ответ: $r_1 = \varepsilon - I_1 R_1$; $r_1 = 2,9 \text{ Ом}$; $r_2 = \frac{2\varepsilon - I_2 R - I_2 r_1}{I_2}$;

$r_2 = 4,5 \text{ Ом}$

1.3.19. Два источника тока с ЭДС $\varepsilon_1 = 2 \text{ В}$ и $\varepsilon_2 = 1,5 \text{ В}$ и внутренними сопротивлениями $r_1 = 0,5 \text{ Ом}$ и $r_2 = 0,4 \text{ Ом}$ включены параллельно сопротивлению $R = 2 \text{ Ом}$. Определить силу тока через это

сопротивление. Ответ: $I = \frac{\varepsilon_1 r_2 + \varepsilon_2 r_1}{r_1 r_2 - R r_2 + R r_1}$; $I = 0,77 \text{ Ом}$.

1.3.20. Определите работу тока на участке, не содержащем источников и имеющем сопротивление $R = 12 \text{ Ом}$, если ток в течение $t = 5 \text{ с}$ равномерно увеличивался от $I_1 = 2 \text{ А}$ до $I_2 = 10 \text{ А}$? Ответ: 2480 Дж

1.3.21. По алюминиевому проводу сечением $S = 0,2 \text{ мм}$ течет ток $I = 0,2 \text{ А}$. Определите силу, действующую на отдельные свободные электроны со стороны электрического поля.

Ответ: $F = e \frac{I \rho}{S}$; $F = 4,6 \cdot 10^{-21} \text{ Н}$

1.3.22. Через лампу накаливания течет ток $I = 0,6 \text{ А}$. Температура вольфрамовой нити диаметром $d = 0,1 \text{ мм}$, равна 220°С . Ток подводится медным проводом $S = 6 \text{ мм}^2$. Определите напряженность электрического поля в вольфраме, в меди.

Ответ: $E_1 = \frac{4I\rho_0}{\pi d^2} \left(+ \alpha t \right)$; $E_1 = 45,8 \text{ В/м}$; $E_2 = \frac{I\rho}{S}$; $E_2 = 1,7 \text{ мВ/м}$.

1.3.23. Определите плотность тока j , если за 2 секунды через проводник сечением $S = 1,6 \text{ мм}^2$ прошло $2 \cdot 10^9$ электронов.

Ответ: $j = \frac{Ne}{St}$; $j = 1 \text{ А/мм}^2$

1.3.24. По медному проводнику $S = 0,8 \text{ мм}^2$ течет ток $0,8 \text{ А}$. Найдите среднюю скорость упорядоченного движения электронов вдоль

проводника, считая, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон. Ответ: $\langle v \rangle = \frac{\mu_0 I}{N_a \rho e S}$; $\langle v \rangle = 7,4$ мкм/с

1.3.25. Сила тока в проводнике равномерно нарастает от нуля до двух ампер нарастает в течение $t = 5$ с. Определите заряд, прошедший по проводнику. Ответ: $q = \frac{It}{2}$; $q = 5$ Кл

1.3.26. Определите силу тока в прямом проводе, длиной 500 м, если суммарный импульс электронов $p = 5,7 \cdot 10^{-8}$ кг·м/с.

Ответ: $I = \frac{pe}{ml}$; $I = 20$ А

1.3.27. Сила тока в металлическом проводнике $I = 0,8$ А, сечение проводника $S = 4$ мм². Принимая, что в каждом кубическом сантиметре металла содержится $2,5 \cdot 10^{22}$ свободных электронов, определить среднюю скорость их упорядоченного движения.

Ответ: $\langle v \rangle = \frac{I}{Sne}$; $\langle v \rangle = 0,53 \cdot 10^7$ м/с.

1.3.28. В цепи на рисунке амперметр показывает силу тока $I = 1,5$ А. Сила тока через сопротивление R_1 равна $I_1 = 0,5$ А. Сопротивление $R_2 = 2$ Ом, $R_3 = 6$ Ом. Определить сопротивление R_1 , а также силу токов I_2 и I_3 , протекающих через сопротивления R_2 и R_3 . Ответ:

$$R_1 = \frac{(-I_1 R_2 \cdot R_3)}{I_1 (R_2 + R_3)}; R_1 = 3 \text{ Ом}; I_1 = \frac{I_1 R_1}{R_2}; I_2 = 0,75 \text{ А}; I_3 = 0,25 \text{ А}.$$

1.3.29. В проводнике при равномерном возрастании силы тока от $I_1 = 1$ А до $I_2 = 2$ А за время $t = 10$ с выделилось количество теплоты $Q = 5$ кДж. Найти сопротивление проводника.

Ответ: $R = \frac{3Q}{(-I_1)t}$; $R = 5 \cdot 10^2$ Ом

1.3.30. В медном проводнике длиной $l = 2$ м и площадью поперечного сечения $S = 0,4$ мм² идет ток. При этом мощность, выделяющаяся в проводнике $P = 0,35$ Вт. Сколько электронов проходит ежесекундно через поперечное сечение проводника?

$$\text{Ответ: } N = \frac{1}{e} \sqrt{\frac{PS}{\rho l}}.$$