

Лекция №2. «Электромагнетизм»

Электростатическое поле. Закон сохранения электрических зарядов. Закон Кулона.

К электрическим явлениям относятся множество различных явлений, как очевидных (например, электризация – притяжение либо отталкивание предметов после их взаимного трения), так и не всегда очевидных (к примеру, электрическую природу имеют сила трения и сила упругости). Мерой участия тел в электрических (в общем случае – электромагнитных) явлениях является физическая величина под названием «электрический заряд».

Электрический заряд (количество электричества) — это физическая скалярная величина, определяющая способность тел быть источником электромагнитных полей и принимать участие в электромагнитном взаимодействии.

Впервые электрический заряд был введён в законе Кулона в 1785 году.

Несмотря на огромное разнообразие веществ, в природе существует только два вида электрических зарядов, их принято называть «положительный» и «отрицательный».

Единица измерения заряда в системе СИ – Кулон (1 Кл).

Опытным путём установлено, что заряд *дискретен*, то есть заряд любого тела равен целому числу *элементарных зарядов*. То есть любой заряд кратен элементарному заряду:

$$|q| = N \cdot |e|$$

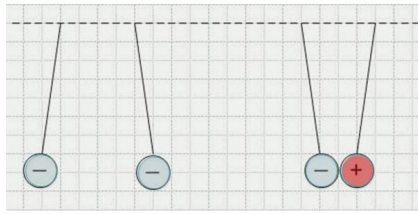
Минимальный электрический «отрицательный» заряд (элементарный заряд) – заряд электрона $e = -1,602177 \cdot 10^{-19}$ Кл $\approx -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл (масса электрона $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг).

Протон является носителем положительного элементарного заряда $q_p = +1,602177 \cdot 10^{-19}$ Кл $\approx +1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл (масса протона $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг).

Закон сохранения заряда: в замкнутой, электрически изолированной системе, полный электрический заряд остается неизменным (сохраняется):

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$$

Одноименные заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются.



ВИДЕО: [Два рода зарядов. Взаимодействие двух заряженных тел.](#) [youtube.com](https://www.youtube.com)

[Опыты по физике. Взаимодействие заряженных тел](#) [youtube.com](https://www.youtube.com)

Закон Кулона: сила взаимодействия двух *точечных* зарядов q_1 и q_2 направлена по прямой, соединяющей центры зарядов, прямо пропорциональна произведению величин зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними r и зависит от свойств среды ϵ , в которой находятся заряды

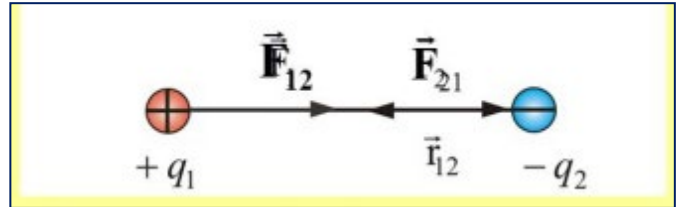
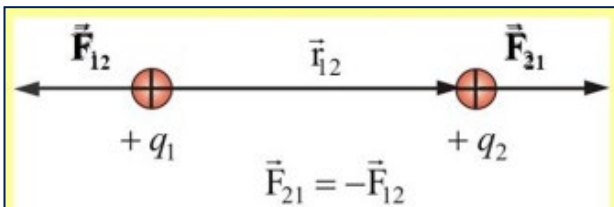
$$F = k \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon \cdot r^2}$$

В СИ коэффициент пропорциональности

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{Н \cdot м^2}{Кл^2}$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{Ф/м}$ – электрическая постоянная;

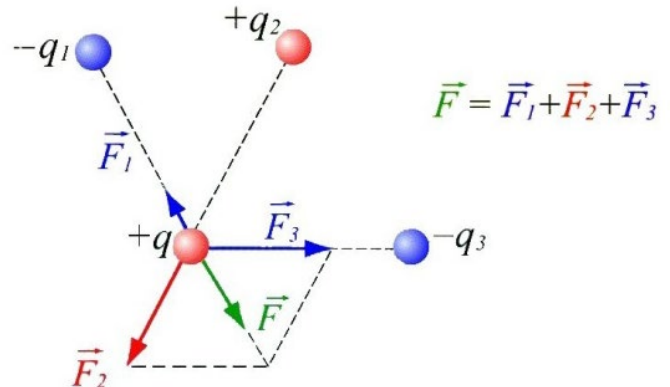
ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды. Для вакуума и воздуха $\epsilon = 1$.



Принцип суперпозиции (для сил): если заряженное тело взаимодействует одновременно с несколькими заряженными телами, то результирующая сила, действующая на данное тело, равна векторной сумме сил, действующих на это тело со стороны всех других заряженных тел в отдельности:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$

Пример:



Задача №1. Два одинаковых металлических шарика, имевших заряды q_1 и q_2 привели в соприкосновение и

снова разделили. Найдите заряды шариков после соприкосновения, если а) $q_1 = +1$ Кл, а $q_2 = 0$; б) $q_1 = +2$ Кл, а $q_2 = -3$ Кл.

Решение:

По закону сохранения электрического заряда сумма зарядов до взаимодействия должна быть равна сумме зарядов после взаимодействия, а поскольку шарики одинаковые по размеру, их заряды после взаимодействия будут одинаковы:

$$q_1 + q_2 = q_1' + q_2' = 2q'$$

Отсюда получим:

$$q' = (q_1 + q_2)/2.$$

В случае а):

$$q' = (1 + 0)/2 = 0,5 \text{ Кл}$$

В случае б):

$$q' = (2 + (-3))/2 = -0,5 \text{ Кл}$$

Ответ: а) 0,5 Кл; б) - 0,5 Кл.

Задача №2. Два металлических шарика с одинаковыми зарядами q , находясь на расстоянии R друг от друга, притягиваются друг к другу с силой Кулона $F = 10$ мН. С какой силой будут притягиваться друг к другу два таких же шарика, но имеющих заряды $q/2$ и $4q$, находящиеся на расстоянии $2R$ друг от друга?

Решение:

1) Воспользуемся формулой закона Кулона. В первом случае сила притяжения F_1 описывается формулой: $F_1 = k \cdot q \cdot q / R^2$

Во втором случае получим: $F_2 = k \cdot (q/2) \cdot 4q / (2R)^2$.

2) Преобразуем второе выражение, вынеся численные коэффициенты перед формулой:

$$F_2 = k \cdot (q/2) \cdot 4q / (2R)^2 = 2 \cdot k \cdot q \cdot q / (4R^2) = (2/4) \cdot k \cdot q \cdot q / R^2 = 0,5 \cdot k \cdot q \cdot q / R^2 = 0,5 \cdot F_1 = 0,5 \cdot 10 = 5 \text{ мН.}$$

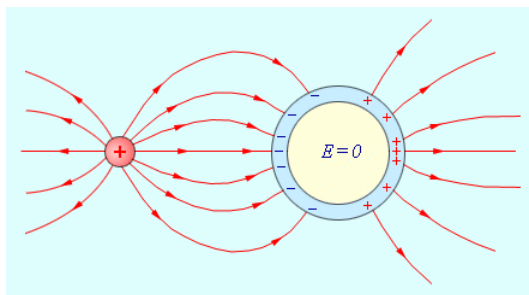
Ответ: 5 мН.

Проводники и диэлектрики в электростатическом поле

В зависимости от концентрации свободных зарядов тела делятся на проводники, диэлектрики и полупроводники. Примеры проводников: металлы в твердом и жидком состояниях, ионизированные газы, растворы электролитов. Примеры диэлектриков: кварц, бумага, резина, стекло, янтарь, эбонит, газы в нормальных условиях.

Электростатическое поле внутри проводника равно нулю. На этом основана *электростатическая защита* – чувствительные к электрическому

полю приборы для исключения влияния поля помещают в металлические корпуса.



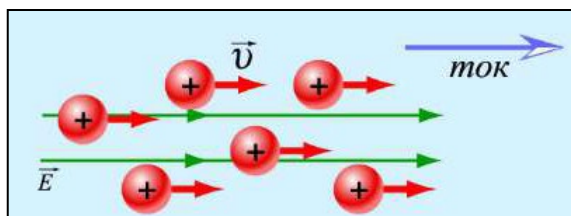
В диэлектриках практически нет свободных зарядов, имеются связанные заряды (диполи).

Если диэлектрик помещен во внешнее электрическое поле, в нем возникает ориентация диполей. Такое явление называется *поляризацией диэлектрика*.

В результате полное электрическое поле внутри диэлектрика оказывается по модулю меньше внешнего поля в ϵ раз (относительная диэлектрическая проницаемость). Такое явление называется *поляризацией диэлектрика*.

Электрический ток

Электрическим током называется направленное движение электрических зарядов. За направление тока условно принимают направление скорости движения положительных зарядов (в металлах ток создают отрицательные заряды - электроны)



Сила тока – скалярная физическая величина, численно равная заряду, протекающему через поперечное сечение проводника за единицу времени (производная от заряда по времени).

$$i = \frac{dq}{dt}$$

$[i] = \text{A}$ (Ампер) $1 \text{A} = 1 \text{Кл/с}$

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

Сила постоянного тока:

$$I = Q/t$$

Задача №3. По проводнику за время $t_1 = 30$ мин проходит заряд $q_1 = 1800$ Кл. Определить силу тока I и время t_2 , в течение которого через проводник проходит заряд $q_2 = 600$ Кл. Ток считать постоянным.

Решение:

1) Переведем все величины в СИ: $t_1 = 30$ мин = $30 \cdot 60 = 1800$ с.

2) Определим силу тока: $I = q_1/t_1 = 1800/1800 = 1$ А.

3) Так как сила тока постоянна, то теперь мы можем найти t_2 :

$$t_2 = q_2/I = 600/1 = 600 \text{ с} = 10 \text{ мин.}$$

Сопротивление проводников

Причина существования сопротивления в проводниках - столкновение свободных электронов с ионами кристаллической решетки.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S},$$

где ρ - удельное сопротивление проводника,

l - длина проводника,

S - площадь поперечного сечения проводника.

$$[R] = \text{Ом}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad \text{или} \quad \sigma = \frac{1}{\rho}$$

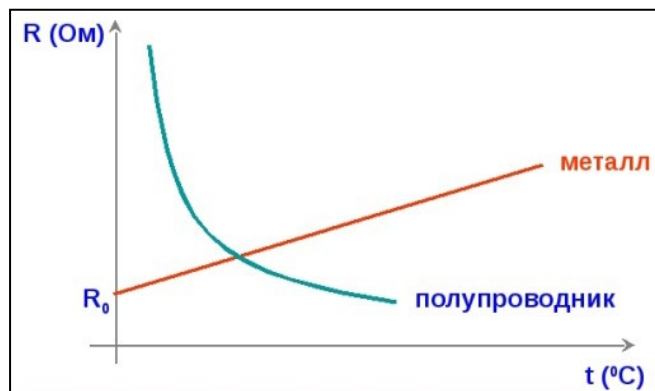
где σ - удельная электропроводность

У металлов с ростом температуры сопротивление возрастает:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \quad \rho_t = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t)$$

где ρ_0, ρ_t — удельные сопротивления вещества проводника соответственно при 0°C и $t^\circ\text{C}$; R_0, R_t — сопротивления проводника при 0°C и $t^\circ\text{C}$, α — температурный коэффициент сопротивления.

Зависимость сопротивления металлов и полупроводников от температуры представлена на графике:



У некоторых проводников и сложных по составу веществ при низких температурах возникает явление *сверхпроводимости*.

Законы Ома

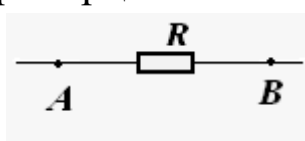
Электродвижущая сила (ЭДС) – скалярная физическая величина, численно равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда внутри источника против сил электростатического поля:

$$\varepsilon = \frac{A^*_{ст}}{q}$$



$$[\varepsilon] = \text{В}$$

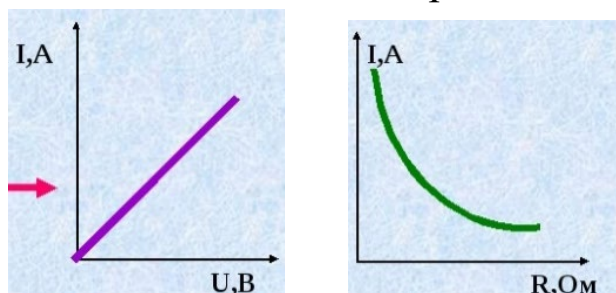
Сила тока на однородном участке цепи прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению участка.



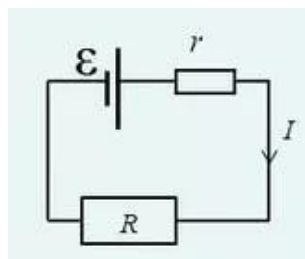
$$I = \frac{U}{R},$$

где U - напряжение на участке, R - сопротивление участка. Эта формула носит название **закона Ома для однородного участка цепи**.

$U_R = R \cdot I$ – напряжение или падение напряжения на резисторе R .



Сила тока в замкнутой цепи равна отношению электродвижущей силы источника к полному сопротивлению цепи (сумме сопротивлений внешнего и внутреннего участка цепи).



$$I = \frac{\varepsilon}{R_{\text{общ}}} = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

где R - электрическое сопротивление внешнего участка цепи, r - электрическое сопротивление внутреннего участка цепи. Эта формула носит название **закона Ома для замкнутой цепи**.

Сила тока короткого замыкания (при $R=0$): $I_{к.з.} = \frac{\mathcal{E}}{r}$

Задача №4. Определите напряжение на резисторе сопротивлением $R = 100$ кОм при силе тока в нем $I = 1$ мА.

Решение:

1) Переведем величины в СИ: $R = 100$ кОм = 100000 Ом, $I = 1$ мА = 0,001 А.

2) Найдем напряжение с помощью формулы закона Ома для участка цепи:

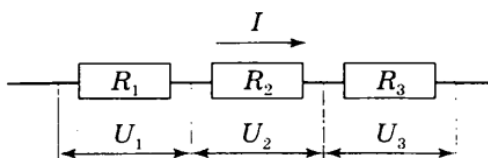
$$U = I \cdot R = 0,001 \cdot 100000 = 100 \text{ В.}$$

Ответ: 100 В.

Соединение элементов электрических цепей

Электрическая цепь включает в себя источники тока и проводники (потребители, резисторы и др.), которые могут соединяться последовательно или параллельно.

При последовательном соединении резисторов сила тока на всех участках цепи одинакова



$$I_0 = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

Падение напряжения на всем участке равно сумме падений напряжений на всех отдельно взятых проводниках

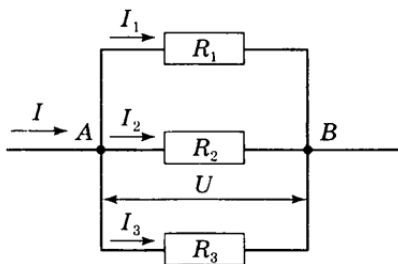
$$U_0 = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

Общее сопротивление цепи равно сумме их сопротивлений

$$R_0 = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

При параллельном соединении сопротивлений падение напряжения во всех ветвях цепи одинаково:

$$U_0 = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$



Сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме токов, текущих в каждом проводнике:

$$I_0 = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

Величина, обратная сопротивлению разветвленного участка, равна сумме величин, обратных сопротивлениям каждого отдельно взятого проводника:

$$\frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

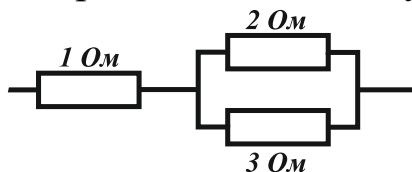
Для двух параллельно соединенных проводников бывает удобно использовать формулу в таком виде:

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

ВИДЕО [Опыты по физике. Сила тока на участке цепи при параллельном соединении](#)

[проводников youtube.com](https://www.youtube.com)

Задача №5. Три резистора (проводники) соединены так, как показано на рисунке. Определите общее сопротивление этого участка.



Решение:

1) Введем обозначения: $R_1 = 1 \text{ Ом}$, $R_2 = 2 \text{ Ом}$, $R_3 = 3 \text{ Ом}$.

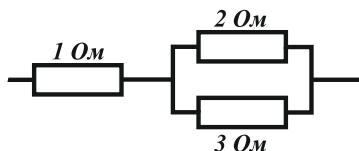
2) Можно заметить, что резисторы R_2 и R_3 соединены параллельно, а R_1 к ним подключен последовательно. Найдем сначала сопротивление участка 2-3:

$$R_{23} = R_2 \cdot R_3 / (R_2 + R_3) = 2 \cdot 3 / (2 + 3) = 6/5 = 1,2 \text{ Ом}$$

3) Теперь найдем полное сопротивление:

$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_{23} = 1 + 1,2 = 2,2 \text{ Ом}.$$

Задача №6. Сила тока, текущего через резистор с сопротивлением 2 Ом, равна $I_2 = 0,3 \text{ А}$ (см. рисунок). Какая сила тока в остальных двух резисторах?



Решение:

1) Введем обозначения: $R_1 = 1 \text{ Ом}$, $R_2 = 2 \text{ Ом}$, $R_3 = 3 \text{ Ом}$.

2) Зная ток и сопротивление, мы можем найти напряжение на резисторе 2 Ом:

$$U_2 = I_2 \cdot R_2 = 0,3 \cdot 2 = 0,6 \text{ В}.$$

3) Так как второй и третий резисторы соединены параллельно, то

$$U_3 = U_2 = 0,6 \text{ В}.$$

4) Теперь найдем силу тока в третьем резисторе:

$$I_3 = U_3/R_3 = 0,2 \text{ А.}$$

5) Сила тока в первом резисторе равна сумме токов во втором и третьем:

$$I_1 = I_2 + I_3 = 0,5 \text{ А.}$$

Работа и мощность тока

Закон Джоуля-Ленца в интегральной форме: количество теплоты, которое выделяется в проводнике при протекании тока, прямо пропорционально силе тока, времени его прохождения по проводнику и падению напряжения на нем

$$Q = \int I^2 \cdot R \cdot dt = \int \frac{U^2}{R} \cdot dt = \int U \cdot I \cdot dt$$

где dQ - количество тепла, выделяющееся за время t ,

R - сопротивление проводника.

Для постоянного тока количество тепла находится без использования интегралов:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t = I \cdot U \cdot t = U^2 \cdot R/t$$

Мощность электрического тока:

$$P = dA/dt = I^2 R = \frac{U^2}{R} = UI$$

$$[P] = \text{Вт.}$$

Мощность, выделяемая во внешней цепи, достигает максимального значения, если *сопротивление внешней цепи равно внутреннему сопротивлению источника*.

Задача №7. Мощность тока в резисторе 200 Вт, его сопротивление 2 Ом. Чему равна сила тока в резисторе?

Решение:

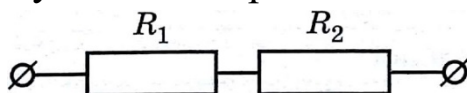
Воспользуемся формулой мощности тока: $P = I^2 R$

Выразим из нее силу тока и найдем ее значение: $I^2 = P/R$

$$I = \sqrt{(P/R)} = \sqrt{(200/2)} = \sqrt{(100)} = 10 \text{ А.}$$

Ответ: 10 А.

Задача №8. По участку цепи, состоящему из резисторов $R_1 = 1 \text{ кОм}$ и $R_2 = 3 \text{ кОм}$ (см. рис), протекает постоянный ток $I = 10 \text{ мА}$. Какое количество теплоты выделится на этом участке за время $t = 1 \text{ мин}$?



Решение:

1) Для расчета количества теплоты воспользуемся законом Джоуля-Ленца:

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

2) Так как от нас требуется определить количество теплоты на всём участке, то сначала найдем общее сопротивление участка (резисторы последовательны):

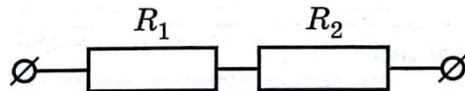
$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 = 1\text{кОм} + 3\text{кОм} = 4\text{кОм}.$$

3) Определим количество теплоты (перевод в СИ сделаем в процессе вычислений):

$$Q = I^2 \cdot R_{\text{общ}} \cdot t = (10\text{мА})^2 \cdot (4\text{кОм}) \cdot (1\text{мин}) = (0,01)^2 \cdot (4000) \cdot (60) = 24 \text{ Дж}.$$

Ответ: 24 Дж

Задача №9. Напряжение между выводами участка цепи (см. рис) равно 100 В. Сопротивления резисторов равны $R_1 = 20 \text{ Ом}$ и $R_2 = 30 \text{ Ом}$. Определите количество теплоты Q_1 , которое выделится в резисторе R_1 за время, равное 2 минутам.



Решение:

1) Так как нам нужно найти количество теплоты только в первом резисторе, нам нужно знать либо напряжение на нем, либо силу тока в нем. Найдем I_1 .

2) Так как резисторы соединены последовательно, то $R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 = 50 \text{ Ом}$. Тогда $I_{\text{общ}} = U_{\text{общ}} / R_{\text{общ}} = 100/50 = 2 \text{ А}$.

3) Для последовательного соединения имеем:

$$I_1 = I_2 = I_{\text{общ}} = 2 \text{ А}.$$

4) Количество теплоты Q_1 :

$$Q_1 = I_1^2 \cdot R_1 \cdot t = 2^2 \cdot 20 \cdot (2 \cdot 60) = 9600 \text{ Дж} = 9,6 \text{ кДж}.$$

Ответ: 9,6 кДж.

Задача №10. Необходимо рассчитать месячную стоимость C электроэнергии, используемой следующими бытовыми приборами: а) фен мощностью $P_1 = 2\text{кВт}$; б) ноутбук мощностью $P_2 = 70 \text{ Вт}$; в) холодильник класса А (суточное энергопотребление 1,5 кВт). Одноставочный тариф на электроэнергию взять равным $P = 3,42 \text{ руб}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$.

Решение:

1) Будем исходить из расчета, что фен работает 20 минут в день, холодильник круглосуточно, ноутбук 10 часов в день, а в месяце возьмем 30 дней.

2) Для удобства расчетов энергию будем выражать не в джоулях (Дж), а в киловатт-часах (кВт·ч), а время работы – в часах.

3) Стоимость найдем по формуле: $C = W \cdot P$,

где W – потребленная за месяц энергия.

А потребленную энергию перед этим найдем через мощность:

$$W = P \cdot t.$$

4) Сделаем расчет для фена:

$$W_1 = P_1 \cdot t = 2 \text{ кВт} \cdot (12 \text{ мин} \cdot 30) = (2 \text{ кВт}) \cdot (0,2 \text{ ч} \cdot 30) = 12 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)}.$$

$$C_1 = W_1 \cdot P = 12 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)} \cdot 3,42 \text{ руб/ (кВт} \cdot \text{ч)} \approx 41 \text{ руб.}$$

5) Сделаем расчет для ноутбука:

$$W_2 = P_2 \cdot t = 60 \text{ Вт} \cdot (10 \text{ ч} \cdot 30) = (0,06 \text{ кВт}) \cdot (10 \text{ ч} \cdot 30) = 18 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)}.$$

$$C_2 = W_2 \cdot P = 18 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)} \cdot 3,42 \text{ руб/ (кВт} \cdot \text{ч)} \approx 61,56 \text{ руб.}$$

6) Сделаем расчет для холодильника:

$$W_3 = P_3 \cdot t = 1,5 \text{ кВт} \cdot (30) = 45 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)}.$$

$$C_3 = W_3 \cdot P = 45 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)} \cdot 3,42 \text{ руб/ (кВт} \cdot \text{ч)} \approx 153,9 \text{ руб.}$$

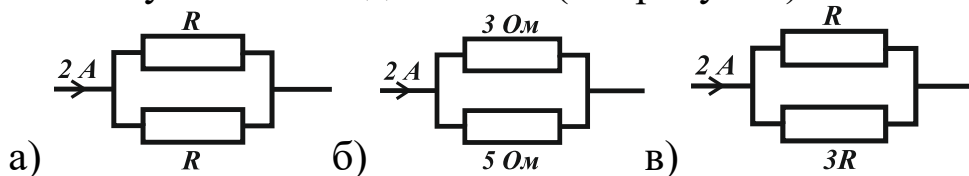
Ответ: 42 руб., 62 руб., 154 руб.

(Подробнее про энергопотребление бытовых приборов можно почитать здесь: <https://tion.ru/blog/klass-energopotrebleniya/>)

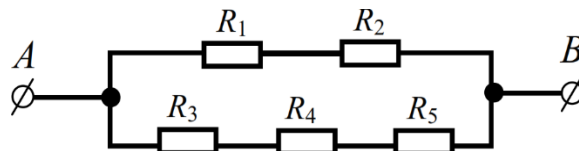
Задачи для самостоятельного решения

1. Определите напряжение на резисторе сопротивлением 100 кОм при силе тока в нем 1 мА.

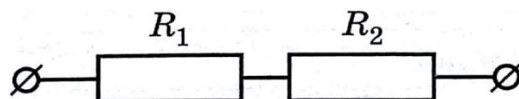
2. Определить силу тока в каждой ветви (см. рисунок).



3. Сопротивление каждого резистора в цепи, показанной на рисунке, равно 100 Ом. Участок подключен к источнику постоянного напряжения выводами А и В. Напряжение на резисторе R_4 равно 12 В. Напряжение между выводами схемы U_{AB} равно



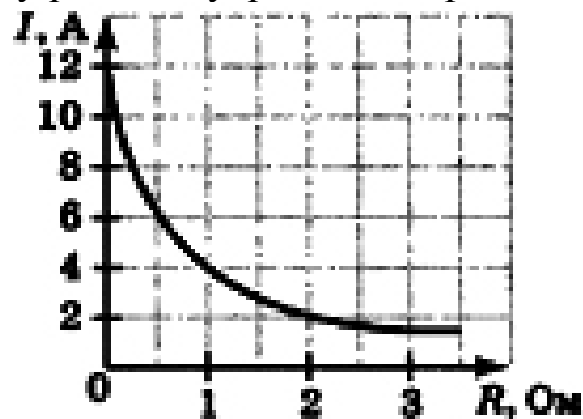
4. По участку цепи, состоящему из резисторов $R_1 = 1$ кОм и $R_2 = 3$ кОм (см. рис), протекает постоянный ток $I = 100$ мА. Какое количество теплоты выделится на этом участке за время $t = 1$ мин? Ответ выразите в килоджоулях (кДж).



5. Если три проводника одинакового сечения и длины и с удельными сопротивлениями $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$, соединить параллельно и подключить к источнику, тока, то сильнее нагреетсяпроводник. Ответ обоснуйте.

6. Если три проводника одинакового сечения и длины и с удельными сопротивлениями $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$, соединить последовательно и подключить к источнику, тока, то сильнее нагреетсяпроводник. Ответ обоснуйте.

7. К источнику постоянного тока с ЭДС $\varepsilon = 6$ В подключили реостат. На рисунке изображен график изменения силы тока в реостате в зависимости от его сопротивления. Чему равно внутреннее сопротивление источника тока?



8. Пользуясь данными графика, определите отношение сопротивлений R_2 к R_1 .

