

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
**Московский физико-технический институт**  
**(государственный университет)**  
**Заочная физико-техническая школа**

**ФИЗИКА**

**Электрические явления**

Задание №3 для 8-х классов

(2014 – 2015 учебный год)



г. Долгопрудный, 2014

*Составитель:* В.И. Плис, доцент кафедры общей физики МФТИ.

Физика: задание №3 для 8-х классов (2014 – 2015 учебный год). – М., 2014, 28 с.

**Срок отправления заданий по физике и математике – 15 января 2015 г.**

**Составитель:**

Плис Валерий Иванович

Подписано 12.11.14. Формат 60×90 1/16.

Бумага типографская. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,75.

Уч.-изд. л. 1,55. Тираж 400. Заказ №30-з.

Заочная физико-техническая школа  
Московского физико-технического института  
(государственного университета)  
ООО «Печатный салон ШАНС»

Институтский пер., 9, г. Долгопрудный, Москов. обл., 141700.  
ЗФТШ, тел./факс (495) 408-51-45 – **заочное отделение**,  
тел./факс (498) 744-63-51 – **очно-заочное отделение**,  
тел. (499) 755-55-80 – **очное отделение**.

*e-mail: [zftsh@mail.mipt.ru](mailto:zftsh@mail.mipt.ru)*

**Наш сайт: [www.school.mipt.ru](http://www.school.mipt.ru)**

© ЗФТШ, 2014

## От составителя задания

Среди множества явлений, изучаемых в физике, достойное место занимают электрические явления. В настоящем Задании на начальном ознакомительном уровне будут рассмотрены лишь некоторые отдельные темы, касающиеся свойств электрических зарядов и электрического тока.

При изложении теоретического материала в Задании не ставилась цель заменить соответствующие параграфы школьного учебника физики. Здесь приводятся лишь основные понятия, определения и законы, касающиеся круга рассматриваемых явлений. Основное внимание уделяется решению задач.

Надеюсь, что работа над Заданием поможет Вам систематизировать знания, полученные в школе, и успешно справиться с контрольной частью Задания.

## Введение

Слово «электричество» может вызвать представление о сложной современной технике: компьютерах, телевизорах, электродвигателях и т. д. Но электричество играет в нашей жизни гораздо более серьёзную роль. Действительно, согласно современной теории строения вещества, силы, действующие между атомами и молекулами, в результате чего образуются жидкие и твёрдые тела, – это электрические силы. Они ответственны и за обмен веществ, происходящий в человеческом организме. Даже когда мы что-нибудь тянем или толкаем, это оказывается результатом действия электрических сил между молекулами руки и того предмета, на который мы воздействуем. И вообще, большинство сил (например, силы упругости, силы реакции опоры) сегодня принято считать электрическими силами, действующими между атомами. Сила тяжести, однако, не относится к электрическим силам.

Электрические явления известны с древних времён, но лишь в последние два столетия они были досконально изучены. По современным представлениям вся совокупность электрических и магнитных явлений есть проявление существования, движения и взаимодействия электрических зарядов. В настоящем Задании мы познакомимся с основными понятиями, определениями и законами, утвердившимися при описании электрических явлений.

## § 1. Электрический заряд и электрическое поле

### 1.1. Статическое электричество.

#### Электрический заряд и его свойства

Слово *электричество* происходит от греческого названия янтаря – *электров*. Янтарь – это окаменевшая смола хвойных деревьев; древние заметили, что если натереть янтарь куском шерстяной ткани, то он будет притягивать лёгкие предметы и пыль. В конце XVI века английский учёный

У. Гильберт обнаружил, что таким же свойством обладают стекло и ряд других веществ, натёртых шёлком. Теперь мы говорим, что в этих случаях тела, благодаря трению, приобретают *электрический заряд*, а сами тела называем *заряженными*.

Все ли электрические заряды одинаковы или существуют различные их виды? Опыт показывает, что существует два и только два вида зарядов, причём заряды одного вида отталкиваются, а заряды разных видов притягиваются. Мы говорим, что *одноимённые заряды отталкиваются, а разноимённые притягиваются*.

Американский учёный Б. Франклин (XVIII век) назвал эти два вида зарядов *положительными* и *отрицательными*. Какой заряд как назвать было совершенно безразлично; Франклин предложил считать заряд наэлектризованной стеклянной палочки положительным. В таком случае заряд, появляющийся на янтаре, потёртом о шерсть, будет отрицательным. Этого соглашения придерживаются и по сей день.

О заряженных телах говорят, что одни тела наэлектризованы сильнее, а другие слабее. Для того чтобы такие утверждения имели смысл, следует установить количественную меру, позволяющую сравнивать степени наэлектризованности тел. Мерой наэлектризованности любого тела является *электрический заряд*  $Q$  этого тела (латинские буквы  $q$  и  $Q$  традиционно используются для обозначения заряда). В свою очередь, незаряженные тела называют *электронейтральными*, или просто нейтральными, их заряд равен нулю.

В международной системе единиц (сокращенно СИ) единицей измерения заряда служит *кулон* (Кл) (в честь французского учёного Шарля Кулона, установившего в 1785 г. закон взаимодействия точечных зарядов). Определение этой единицы в СИ даётся через единицу измерения силы тока и будет представлено ниже.

Развитие науки о природе привело не только к открытию элементарных частиц (*протонов, электронов, нейтронов* и др.), но и показало, что электрический заряд не может существовать сам по себе, без элементарной частицы – носителя заряда.

Важными свойствами заряда являются его *делимость* и *независимость от скорости*.

Экспериментально установлена *делимость* электрического заряда и *существование* его *наименьшей порции*. Эту наименьшую величину электрического заряда называют *элементарным зарядом*  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Несмотря на значительные экспериментальные усилия, к настоящему времени не обнаружены в свободном состоянии носители с зарядом  $|q| < e$ , где  $e$  – элементарный заряд.

Носителями электрического заряда являются элементарные частицы, например, электроны (заряд каждого  $q_e = -e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл), протоны

(заряд каждого  $q_p = e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл). Экспериментально установлено, что отрицательный заряд электрона равен (с высокой точностью) по абсолютному значению положительному заряду протона. Величина заряда любого тела кратна элементарному заряду.

**Пример 1.** Металлическому шару путём удаления части электронов сообщается заряд  $Q = 2,0 \cdot 10^{-6}$  Кл. Сколько электронов удалено с шара? На сколько изменится масса шара? Элементарный заряд  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, масса электрона  $m_e = 0,9 \cdot 10^{-30}$  кг.

**Решение.** Количество удалённых электронов найдём из равенства

$$N = \frac{-Q}{-e} = \frac{2,0 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,25 \cdot 10^{13}.$$

Масса электронов, удалённых с шара,

$$m = N \cdot m_e = 1,25 \cdot 10^{13} \cdot 0,9 \cdot 10^{-30} = 1,125 \cdot 10^{-17} \text{ кг}$$

даёт ответ на второй вопрос задачи. Отметим, что убыль массы шара очень мала.

Независимость элементарного заряда от скорости носителя доказывается фактом электронейтральности атомов, в которых вследствие различия масс электрона и протона лёгкие электроны, видимо, движутся значительно быстрее массивных протонов. Если бы заряд зависел от скорости, нейтральность атомов не могла бы соблюдаться. Так что *независимость заряда от скорости принимается в качестве одного из экспериментальных фактов, на которых строится теория электричества.*

Лишь в XIX веке стало ясно: причина существования электрического заряда кроется в самих атомах. Позднее (в другом Задании) мы обсудим строение атома и развитие представлений о нём более подробно; здесь же кратко остановимся на основных идеях, которые помогут нам лучше понять природу электричества.

## 1.2. Объяснение явления электризации

По современным представлениям атом состоит из массивного положительно заряженного ядра, состоящего из протонов и нейтронов, и движущихся вокруг ядра отрицательно заряженных электронов. В нормальном состоянии положительный заряд ядра (его носителями являются находящиеся в ядре протоны) равен по величине (т. е. по модулю) отрицательному заряду электронов, и атом в целом электрически нейтрален. Однако атом может терять или приобретать один или несколько электронов. Тогда его заряд будет положительным или отрицательным, и такой атом называется ионом.

В твёрдом теле ядра атомов могут колебаться, оставаясь вблизи фиксированных положений, в то время как часть электронов движется свободно. Электризацию трением можно объяснить тем, что в различных веществах ядра удерживают электроны с различной силой. Когда пластмассовая

линейка, которую натирают бумажной салфеткой, приобретает отрицательный заряд, это означает, что электроны в бумажной салфетке удерживаются слабее, чем в пластмассе, и часть их переходит с салфетки на линейку. Положительный заряд салфетки равен по величине отрицательному заряду, приобретённому линейкой. Таким образом, при электризации тел заряды не создаются, а перераспределяются. Этим и объясняется явление электризации: электроны удаляются из тела или заимствуются у атомов другого тела, но не уничтожаются и не создаются вновь. Следует заметить, что при описанном способе электризации трение не играет принципиальной роли: сдавливая тела, мы просто сближаем их поверхности, которые без этого соприкасались бы в немногих точках вследствие неровностей и выступов.

Наэлектризовать тело можно и другими способами. Например, приведя незаряженное тело в соприкосновение с заряженным. Возможна электризация через влияние, т. е. без непосредственного контакта. Опыт показывает, что под действием заряженного тела на незаряженном может происходить перераспределение электронов или упорядочение молекул (или атомов), вследствие чего части незаряженного тела оказываются наэлектризованными. Это явление получило название электризации через влияние, или электростатической индукции, а заряды, возникающие вследствие перераспределения (упорядочения), индуцированными.

Электризация у некоторых веществ может происходить под действием электромагнитных волн: электроны покидают облучаемую поверхность, в результате тело заряжается положительно. Это явление называется фотоэлектрическим эффектом, или кратко фотоэффектом.

**Пример 2.** В результате действия ультрафиолетового электромагнитного излучения на первоначально незаряженное тело его поверхность покинуло  $N = 4,0 \cdot 10^{10}$  электронов. Найдите заряд  $Q$  тела? Элементарный заряд  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

**Решение.** Положительный заряд тела будет обусловлен некомпенсированным электронами зарядом  $Q = N \cdot e = 4,0 \cdot 10^{10} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 6,4 \cdot 10^{-9}$  Кл.

### 1.3. Проводники и изоляторы

По поведению зарядов в наэлектризованном теле все вещества делятся на *проводники* и *изоляторы* (диэлектрики). В *диэлектриках* сообщённый им заряд остаётся в том месте, куда он был помещён при электризации. В *проводниках* сообщённый заряд может свободно перемещаться по всему телу. Именно поэтому проводящие тела можно заряжать электризацией через влияние. Почти все природные материалы попадают в одну из этих двух резко различных категорий. Есть, однако, вещества (среди которых следует назвать кремний, германий, углерод), принадлежащие к промежуточной, но тоже резко обособленной категории. Их называют полупроводниками.

С точки зрения атомной теории электроны в изоляторах связаны с атомами очень прочно, в то время как *в проводниках многие электроны связаны с атомами очень слабо и могут свободно перемещаться* внутри вещества. Такие электроны называют «свободными», или *электронами проводимости*. Слово «свободными» взято в кавычки, так как *свойства электронов в металле значительно отличаются от свойств действительно свободных электронов в вакууме*. В металлических телах – проводниках электричества – число свободных электронов огромно. Проиллюстрируем это утверждение на следующем примере.

**Пример 3.** Оцените число  $n$  свободных электронов в  $V = 1 \text{ м}^3$  меди, считая, что в меди в среднем в расчёте на один атом свободным является один электрон. Плотность меди  $\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , в  $M = 64 \text{ г}$  меди содержится  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  атомов.

**Решение.** Согласно условию число свободных электронов в любом объёме меди равно числу атомов в нём. Поэтому определим число атомов в объёме  $V$ . Для этого следует массу меди  $\rho V$  разделить на  $M$  и умножить

$$\text{на } N_A, \text{ т. е. } N = \frac{\rho V}{M} N_A = \frac{8,9 \cdot 10^3 \cdot 1}{64 \cdot 10^{-3}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \approx 8,4 \cdot 10^{28}.$$

Найденная величина называется концентрацией носителей.

#### 1.4. Закон сохранения электрического заряда

*Сохранение электрического заряда* представляет собой важнейшее известное из опыта его свойство: *в изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех тел остаётся неизменной*. Справедливость этого закона подтверждается не только в процессах электризации, но и в наблюдениях над огромным числом рождений, уничтожений и взаимных превращений элементарных частиц. Закон сохранения электрического заряда – один из самых фундаментальных законов природы. Неизвестно ни одного случая его нарушения. Даже в тех случаях, когда происходит рождение новой заряженной частицы, обязательно одновременно рождается другая частица с равным по величине и противоположным по знаку зарядом.

Электрический заряд элементарной частицы не зависит ни от выбора системы отсчёта, ни от состояния движения частицы, ни от её взаимодействия с другими частицами. Поэтому и заряд макроскопического тела не зависит ни от движения составляющих его частиц, ни от движения тела как целого.

**Пример 4.** Два одинаковых проводящих шарика, несущих заряды  $Q_1 = -9,0 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$  и  $Q_2 = 2,0 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ , приводят в соприкосновение и удаляют друг от друга. Какими станут заряды  $Q'_1$  и  $Q'_2$  шариков?

**Решение.** После приведения шариков в соприкосновение заряды, свободно перемещающиеся в проводниках, придут в движение и разделятся

поровну между шариками. Действительно у зарядов «нет оснований предпочесть» один из шариков: «с точки зрения зарядов» шарики неотличимы. Тогда  $Q'_1 = Q'_2$ . Заряды шариков найдём по закону сохранения электрического заряда:

$$Q_1 + Q_2 = 2Q'_1.$$

$$\text{Отсюда } Q'_1 = \frac{Q_1 + Q_2}{2} = \frac{-9,0 \cdot 10^{-9} + 2,0 \cdot 10^{-9}}{2} = -3,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

*Соображения симметрии*, использованные при решении задачи, являются важнейшими в физике, к ним мы будем неоднократно обращаться в дальнейшем в различных разделах курса физики.

**Пример 5.** Свободный нейтрон  $n$  – незаряженная частица – распадается на протон  $p$ , электрон  $e^-$  и электронное антинейтрино  $\tilde{\nu}_e$ . Схему этой реакции записывают в виде  $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$ . Найдите заряд  $q$  антинейтрино.

**Решение.** По условию нейтрон – незаряженная частица. Заряды протона и электрона равны соответственно  $e$  и  $-e$ . Из закона сохранения заряда следует, что заряд нейтрона равен сумме зарядов продуктов реакции, т. е. протона, электрона и антинейтрино:

$$0 = e + (-e) + q.$$

Отсюда  $q = 0$ .

Заряд электронного антинейтрино равен нулю.

## 1.5. Взаимодействие заряженных тел. Электрическое поле

Заряженные тела воздействуют друг на друга. Сила взаимодействия двух зарядов зависит от величин этих зарядов и от расстояния между ними. Долгое время оставалось неясным, посредством чего взаимодействуют заряженные тела, если они не вступают в непосредственный контакт друг с другом. Кулон был убеждён, что промежуточная среда, т. е. «пустота» между зарядами никакого участия во взаимодействии не принимает.

Такая точка зрения, несомненно, была навеяна впечатляющими успехами ньютоновской теории тяготения, блестяще подтверждавшейся астрономическими наблюдениями. Однако сам Ньютон писал: «Непонятно, каким образом неодушевлённая косная материя, без посредства чего-либо иного, что нематериально, могла бы действовать на другое тело без взаимного прикосновения».

В 30-е годы XIX века английским естествоиспытателем М. Фарадеем была введена в физику идея *поля* как материальной среды, посредством которой осуществляется любое взаимодействие пространственно удалённых тел. М. Фарадей считал, что «материя присутствует везде, и нет промежуточного пространства, не занятого ею». Фарадей развил последова-



тельную концепцию электромагнитного поля, основанную на идее конечной скорости распространения взаимодействия. Законченная теория электромагнитного поля в строгой математической форме была через 30 лет развита другим английским физиком, Дж. Максвеллом.

По современным представлениям электрические *заряды* наделяют окружающее их пространство особыми физическими свойствами – создают *электрическое поле*. Основным свойством поля является то, что на находящуюся в этом поле заряженную частицу, действует некоторая сила, т. е. *взаимодействие* электрических *зарядов* осуществляется *посредством* создаваемых ими *полей*. Поле, создаваемое неподвижными зарядами, не изменяется со временем и называется электростатическим.

Таким образом, электрическое *поле представляет собой особый вид материи (отличный от вещества), которое создаётся электрическими зарядами и которое обнаруживается по действию на электрические заряды*. Более подробно взаимодействие электрических зарядов и электрические поля, создаваемые зарядами, будут рассмотрены в десятом классе, а мы перейдём к изучению вопросов, связанных с электрическим током.

## § 2. Электрический ток

### 2.1. Электрический ток в проводниках.

#### Направление электрического тока. Сила и плотность тока

Направленное движение электрических зарядов называется *электрическим током*. Носителями зарядов в зависимости от типа проводника могут быть электроны и ионы. В металлических проводниках – это *свободные электроны*, или *электроны проводимости*, в гальванических ваннах, т. е. в растворах электролитов, – положительные и отрицательные ионы. Тела или вещества, в которых можно создать электрический ток, называют проводниками электрического тока. Проводниками являются все металлы, водные растворы солей или кислот, ионизованные газы.

При движении свободных заряженных частиц происходит перенос заряда. Количественной характеристикой – *силой  $I$  тока* – принято считать скорость переноса заряда через любое поперечное сечение проводника, т. е. *количество заряда, перемещённого через «контрольную поверхность», на которой осуществляется подсчёт пересёкшего её заряда, в единицу времени*:

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

где  $q$  – заряд, прошедший через произвольное фиксированное поперечное сечение проводника за время от 0 до  $t$ . Если сила тока не изменяется со временем, ток называют *постоянным*. Единица измерения силы тока в си-

стеме СИ называется ампером (А) (в честь А.М. Ампера – французского учёного XIX века) и вводится через магнитное взаимодействие токов.

Один *ампер* есть сила такого тока, поддерживаемого в двух бесконечных (очень длинных) прямолинейных параллельных проводниках ничтожно малой площади поперечного сечения, расположенных на расстоянии 1 м в вакууме, при котором в расчёте на 1 метр длины проводника действует сила  $F = 2 \cdot 10^{-7}$  Н.

Единица измерения силы тока *ампер*, наряду с *метром*, *секундой*, *килограммом*, является основной единицей системы СИ. Единица измерения заряда *кулон* (Кл) является производной и вводится в соответствии с (1): один *кулон* – это электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника при силе тока 1А за 1с, т. е.  $1\text{Кл} = 1\text{А} \cdot 1\text{с}$ .

За *направление электрического тока* принимают направление, в котором движутся положительно заряженные носители тока.

Отношение силы  $I$  тока к площади  $S$  поперечного сечения проводника называется плотностью тока:

$$j = \frac{I}{S}, \quad (2)$$

которая равна силе тока в расчёте на единицу площади поперечного сечения.

**Пример 6.** По проводу течёт постоянный ток. Через произвольное поперечное сечение за время  $t = 2$  мин протёк заряд  $q = 1,2$  Кл. Найдите силу  $I$  тока в проводе и его плотность  $j$ . Площадь поперечного сечения проводника  $S = 0,5 \text{ мм}^2$ .

**Решение.** Силу тока определим по формуле (1):

$$I = \frac{q}{t} = \frac{1,2}{120} = 0,01 \text{ А},$$

плотность тока найдём по формуле (2):

$$j = \frac{I}{S} = \frac{0,01}{0,5 \cdot 10^{-6}} = 2 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2.$$

**Пример 7.** Согласно модели, предложенной Нильсом Бором, в основном состоянии атома водорода электрон движется вокруг покоящегося протона по круговой орбите радиуса  $r = 0,53 \cdot 10^{-10}$  м со скоростью  $v = 2,2 \cdot 10^6$  м/с. Какой величине  $I$  тока эквивалентно движение электрона по орбите? Каково направление этого тока? Элементарный заряд  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

**Решение.** В рассматриваемой модели электрон обращается вокруг протона с периодом  $T = \frac{2\pi r}{v}$ . За  $t = 1$  с электрон пересечёт любую контрольную поверхность, на которой происходит подсчёт переносимого заряда,

$v = \frac{1}{T}$  раз. Тогда через эту поверхность за  $t = 1$  с пройдёт заряд  $q = e \cdot v$ ,

т. е. сила эквивалентного тока в соответствии с (1) равна

$$I = \frac{q}{t} = ev = e \frac{v}{2\pi r} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \frac{2,2 \cdot 10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,53 \cdot 10^{-10}} \approx 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Поскольку электрон – отрицательно заряженная частица, то направление рассматриваемого тока противоположно направлению движения электронов.

## 2.2. Электрические цепи. Источники электрического тока

Электрический ток течёт в *электрических цепях*, представляющих собой различные приборы и устройства, соединённые проводниками.

Если бы носители заряда, приведённые в движение в замкнутом проводнике, не взаимодействовали с ионами, то они двигались бы бесконечно долго. Такой ток можно наблюдать в некоторых веществах при весьма низких температурах; удельное сопротивление таких веществ – их называют сверхпроводниками – равно нулю при этих температурах.

Но в большинстве проводников при протекании тока движущиеся заряженные частицы взаимодействуют с неподвижными и теряют кинетическую энергию.

Для получения постоянного тока, т. е. не изменяющегося с течением времени, на заряды в электрической цепи должны действовать не только силы электрического поля, но и другие силы, отличные от сил электрического взаимодействия. Такие силы получили общее название *сторонних электродвижущих сил*. Всякое устройство, в котором возникают сторонние силы, называют источником тока. Источниками тока являются, например, батарейки, аккумуляторы и т. д.

Сторонние силы в источниках возникают по разным причинам. В химических источниках, например, в автомобильном аккумуляторе или в гальваническом элементе, они возникают благодаря химическим реакциям в области контакта пластин аккумулятора или электродов батарейки с жидким электролитом. В фотоэлементе они возникают в результате действия электромагнитного излучения на электроны в металле или полупроводнике. В генераторах на электростанции сторонние силы возникают в проводниках при движении их в магнитном поле.

Если воспользоваться гидростатической аналогией, то силы электрического поля в электрической цепи можно уподобить силе тяжести, стремящейся выравнять уровни жидкости в сообщающихся сосудах; источник тока с действующими в нём сторонними электродвижущими силами можно сравнить с насосом, работающим против силы тяжести и восстанавливающим разность уровней в сосудах, несмотря на течение жидкости.

Источник тока по результатам своего действия представляет собой устройство, отделяющее положительные заряды от отрицательных. После

разделения заряды перемещаются на полюса (электроды) источника. При этом один из электродов заряжается положительно, другой отрицательно. И если к источнику подключить проводник, то эти заряды действуют на заряды проводника вблизи полюсов, те в свою очередь действуют на соседние и т. д. В результате этих коллективных взаимодействий в цепи *на поверхности проводника* возникает такое *распределение зарядов*, которое *обеспечивает существование внутри проводника электрического поля*, а в проводнике под действием сил этого поля течёт электрический ток.

### 2.3. Электрическое напряжение. Работа и мощность электрического тока. Тепловое действие тока

В электрической цепи, подключённой к источнику, возникают электрические силы, действующие на носители зарядов и приводящие их в движение. Пусть под действием электрической силы  $F$  частица, несущая заряд  $q$ , переместилась вдоль проводника из точки 1 в точку 2, а сила  $F$  совершила над заряженной частицей работу  $A_{12}$ . Отношение работы  $A_{12}$  электрической силы над зарядом  $q$  при перемещении его из точки 1 в точку 2 к самому заряду  $q$  называют электрическим напряжением между точками 1 и 2:

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q}. \quad (3)$$

Единицей измерения напряжения в СИ является *вольт* (В).

*За один вольт принимается напряжение на концах проводника, при котором работа сил электрического поля по перемещению через этот проводник заряда в один кулон равна одному джоулю.*

Эта единица названа в честь итальянского физика А. Вольта, который в 1800 г. изобрёл электрическую батарею и впервые получил с её помощью постоянный ток, устойчиво поддерживавшийся в электрической цепи. Это открытие ознаменовало начало новой эпохи, полностью преобразившей нашу цивилизацию: современная жизнь немыслима без использования электрического тока.

В соотношении (3) индексы 1 и 2 можно опустить, если помнить, что 1 – это точка «старта», 2 – точка «финиша».

Зная напряжение  $U$  на концах проводника и силу тока  $I$ , текущего в проводнике в течение времени  $t$  постоянного тока, вычислим заряд  $q = I \cdot t$ , который протечёт за указанное время по проводнику. Тогда за это время силы электрического поля в проводнике совершат работу

$$A = q \cdot U = I \cdot t \cdot U. \quad (4)$$

Это позволяет судить о скорости совершения работы электрическими силами, т. е. о *мощности*, развиваемой силами электрического поля. Из (4) следует, что в проводнике, напряжение на концах которого равно  $U$ , а сила тока  $I$ , силы электрического поля в единицу времени совершают работу

$$P = \frac{A}{t} = I \cdot U. \quad (5)$$

Напомним, что единицей измерения мощности в СИ служит *ватт* (Вт).

Очень часто работу и мощность электрических сил называют соответственно работой и мощностью электрического тока, тем самым подчёркивают, что это работа по поддержанию электрического тока в цепи.

**Пример 8.** По проводнику в течение  $T = 1$  мин течёт постоянный ток силой  $I = 0,2$  А. Напряжение на проводнике  $U = 1,5$  В. Какую работу  $A$  совершают электрические силы в проводнике за указанное время? Найдите мощность  $P$  электрического тока в проводнике.

**Решение.** За время  $T$  через проводник пройдёт заряд  $Q = I \cdot T$ . Работа сил электрического поля над этим зарядом в соответствии с (4) равна

$$A = Q \cdot U = I \cdot T \cdot U = 0,2 \cdot 60 \cdot 1,5 = 18 \text{ Дж.}$$

Для ответа на второй вопрос задачи воспользуемся соотношением (5):

$$P = I \cdot U = 0,2 \cdot 1,5 = 0,3 \text{ Вт.}$$

Заметим, что в повседневной жизни, рассчитываясь «за электричество», мы оплачиваем расход электроэнергии – работу электрических сил, а не мощность. И здесь принято работу электрических сил выражать во внесистемных единицах – *киловатт-часах*:

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 1000 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

Работа электрического тока может идти на изменение механической и внутренней энергий проводника. Например, в результате протекания электрического тока через электродвигатель его ротор (подвижная часть, способная вращаться, в отличие от статора) раскручивается. При этом большая часть работы электрических сил идёт на увеличение механической энергии ротора, а также других тел, с которыми ротор связан теми или иными механизмами. Другая часть работы электрического тока (в современных электродвигателях один – два процента) идёт на изменение внутренней энергии обмоток двигателя, что приводит к их нагреванию (обмотка электродвигателя представляет собой катушку, изготовленную обычно из меди, с большим числом витков).

Обсудим *тепловое действие электрического тока* более подробно. Из опыта известно, что электрический ток нагревает проводник. Объясняется это явление тем, что свободные электроны в металлах, перемещаясь под действием сил электрического поля, взаимодействуют с ионами вещества и передают им свою энергию. В результате увеличивается энергия колебания ионов в проводнике, его температура растёт, при этом говорят, что в проводнике за некоторое время  $t$  выделяется количество теплоты  $Q_{\text{тепл}}$ . Если проводник с током неподвижен и величина тока постоянна, то работа электрических сил идёт на изменение внутренней энергии проводника. По закону сохранения энергии это количество равно работе сил электрического поля (4) в проводнике за то же самое время, т. е.

$$Q_{\text{тепл}} = I \cdot t \cdot U. \quad (6)$$

Отсюда мощность  $P$  тепловыделения, т. е. количество теплоты, выделяющейся в единицу времени на участке цепи, где напряжение равно  $U$ , а сила тока равна  $I$ , составляет

$$P = \frac{Q_{\text{тепл}}}{t} = U \cdot I. \quad (7)$$

**Пример 9.** По спирали электроплитки, подключённой к источнику с напряжением  $U = 120$  В, протекает постоянный ток силой  $I = 5$  А в течение  $T = 1$  ч. Какое количество теплоты  $Q_{\text{тепл}}$  отдаёт при этом плитка в окружающую среду?

**Решение.** В окружающую среду будет передано то количество теплоты, которое выделится в спирали нагревательного элемента плитки за указанное время. По формуле (6) находим:

$$Q_{\text{тепл}} = I \cdot T \cdot U = 5 \cdot 3600 \cdot 120 = 2,16 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

**Пример 10.** Электродвигатель, включённый в электрическую сеть с напряжением  $U = 24$  В, за время  $T = 1$  ч работы совершил механическую работу  $A = 1680$  кДж. Сила тока в обмотке  $I = 20$  А. Найдите мощность  $P$  электрического тока и коэффициент полезного действия  $\eta$  двигателя. Какое количество теплоты  $Q_{\text{тепл}}$  выделится в обмотке?

**Решение.** Мощность электрического тока найдём по формуле (5):

$$P = I \cdot U = 20 \cdot 24 = 480 \text{ Вт.}$$

По определению коэффициент полезного действия (КПД)  $\eta$  двигателя равен отношению полезной механической работы  $A$  к работе электрических сил  $A_{\text{эл}}$ , умноженному на 100%. С учётом выражения (4) для работы электрических сил находим КПД электродвигателя:

$$\eta = \frac{A}{A_{\text{эл}}} \cdot 100\% = \frac{A}{UIT} \cdot 100\% = \frac{1680 \cdot 10^3}{24 \cdot 20 \cdot 3600} \cdot 100\% \approx 97\% .$$

Количество  $Q_{\text{тепл}}$  теплоты, выделившейся в обмотке, найдём по закону сохранения энергии  $A_{\text{эл}} = A + Q_{\text{тепл}}$ . Отсюда  $Q_{\text{тепл}} = A_{\text{эл}} - A = UIT - A = 24 \cdot 20 \cdot 3600 - 1680 \cdot 10^3 = 48 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$

## 2.4. Закон Ома. Электрическое сопротивление.

### Закон Джоуля – Ленца

Как отмечалось выше, для поддержания постоянного тока в проводнике, т. е. движения электронов с постоянной скоростью, необходимо непрерывное действие сил электрического поля на носители заряда. Это означает, что электроны в проводниках движутся «с трением», иначе говоря, проводники обладают электрическим сопротивлением.

Если состояние проводника остаётся неизменным (не изменяется его температура и т. д.), то для каждого проводника существует однозначная зависимость между напряжением  $U$  на концах проводника и силой  $I$  тока в нём  $I = f(U)$ . Она называется вольтамперной характеристикой данного проводника.

Для многих проводников эта зависимость особенно проста – линейная: сила тока прямо пропорциональна приложенному напряжению, т. е.

$$I = \frac{1}{R}U, \quad (8)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление проводника (постоянная при неизменных условиях величина).

Этот закон носит название закона Ома. Немецкий физик Г. Ом в 1827 г. в результате серии экспериментов установил, что для широкого класса проводников сила  $I$  электрического тока в проводнике пропорциональна напряжению  $U$  на концах проводника.

Сопротивление  $R$  проводника зависит от рода вещества проводника, от его размеров и формы, а также от состояния проводника.

Единицей сопротивления в СИ является один Ом (Ом). За один Ом принимается сопротивление такого проводника, в котором при напряжении между его концами один *вольт* течёт постоянный ток силой один *ампер*:  $1\text{Ом} = 1\text{В}/1\text{А}$ .

Вытекающее из закона Ома (8) соотношение

$$R = \frac{U}{I} \quad (9)$$

можно рассматривать и как *определение сопротивления по приведённой формуле*.

Г. Ом установил, что для проводников  $R$  не зависит от  $U$ .

В технических приложениях для описания процессов в электрических цепях часто используется понятие вольтамперной характеристики. Для проводников, подчиняющихся закону Ома (8), графиком зависимости силы  $I$  тока в проводнике от напряжения  $U$  на нём будет прямая линия, проходящая через начало координат (см. рис. 1). При этом говорят, что проводник имеет линейную вольтамперную характеристику.

В то же время для полупроводников, электронных ламп, диодов, транзисторов зависимость  $I = f(U)$  носит сложный характер, и такие элементы называют нелинейными (или *неомическими*). Для таких элементов величина

$R$ , вычисленная по формуле  $R = \frac{U}{I}$ , зависит от  $U$ . В частности, при

измерении вольтамперной характеристики лампочки накаливания с вольфрамовой нитью мы обнаружим, что она имеет вид, схематически показанный на рис. 2. Искривление вольтамперной характеристики связано с нагревом нити и увеличением сопротивления нити накала с ростом

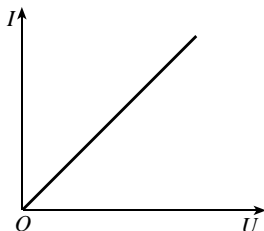


Рис. 1

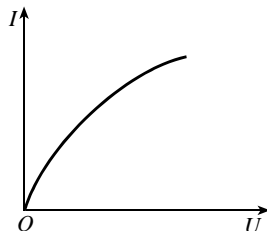


Рис. 2

температуры. В некоторых устройствах, таких как диод, сопротивление зависит от направления тока.

Обсудим вопрос о тепловыделении в проводнике. С учётом закона Ома (8) формула (7) для мощности тепловыделения принимает вид:

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = I^2 R. \quad (10)$$

Другими словами, если через резистор  $R$  протекает постоянный ток силой  $I$ , то за  $t$  секунд в резисторе выделяется количество теплоты, равное

$$Q_{\text{тепл}} = P \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t. \quad (11)$$

Соотношения (10), (11) являются математическим выражением закона, открытого в XIX веке практически одновременно и независимо английским физиком Д. Джоулем и русским физиком Э.Х. Ленцем.

Обратим внимание, что полученный закон является прямым следствием закона сохранения энергии в применении к движению электрических зарядов под действием сил электрического поля.

## 2.5 Расчёт сопротивления проводника.

### Удельное сопротивление

Причиной электрического сопротивления является взаимодействие электронов с ионами кристаллической решётки. Зависимость сопротивления проводника от его размеров и вещества, из которого изготовлен проводник, на опытах изучил Г. Ом. Он установил, что сопротивление проволоки длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$  определяется по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (12)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление вещества, из которого изготовлен проводник. Эту величину определяют экспериментально, результаты измерений удельного сопротивления приводят в физических справочниках (и в справочных разделах задачников по физике).



В соответствии с формулой (12) единицей удельного сопротивления в СИ служит Ом · м.

Удельное сопротивление вещества зависит от температуры. Для металлов с ростом температуры растёт и удельное сопротивление. У электролитов наблюдается обратная зависимость. Эти обстоятельства следует учитывать на практике при расчётах спиралей электронагревательных приборов, нитей лампочек накаливания т. д.

**Пример 11.** Резистор сопротивлением  $R = 38 \text{ Ом}$  изготовлен из медного провода кругового сечения массой  $m = 11,2 \text{ г}$ . Найдите длину  $l$  провода. Удельное сопротивление меди  $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , плотность меди  $\delta = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . *Обратите внимание, что в настоящем примере приняты обозначения:  $\delta$  – плотность,  $\rho$  – удельное сопротивление.*

**Решение.** Обозначим площадь поперечного сечения проводника  $S$ . Тогда объём проводника равен  $V = S \cdot l$ , его масса  $m = \delta \cdot V = \delta \cdot S \cdot l$ . По формуле (12) сопротивление проводника равно  $R = \rho \frac{l}{S}$ .

Исключая  $S$  из двух последних соотношений, приходим к ответу на вопрос задачи:

$$l = \sqrt{\frac{mR}{\rho\delta}} = \sqrt{\frac{11,2 \cdot 10^{-3} \cdot 38}{1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 8,9 \cdot 10^3}} \approx 53 \text{ м}.$$

## 2.6. Соединение проводников в электрической цепи

В электрических цепях, с которыми мы встречаемся на практике, проводники могут быть соединены различными способами. Наиболее простые способы соединения известны как последовательное и параллельное соединения резисторов.

Рассмотрим участок  $AB$  цепи, в котором *резисторы* с сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  соединены **последовательно** (рис. 3). Поставим вопрос: каким сопротивлением  $R_{\text{эКВ}}$ , подключённым между точками  $A$  и  $B$ , можно заменить последовательно соединённые сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  так, чтобы напряжение на участке  $AB$  и сила тока, текущего от  $A$  к  $B$ , остались неизменными?

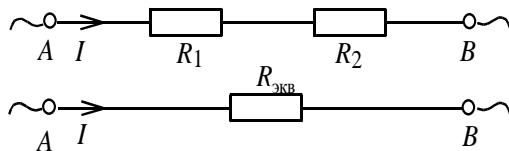


Рис. 3

Для ответа на поставленный вопрос заметим, что при последовательном соединении сила тока во всех проводниках одинакова – иначе заряды накапливались бы (или исчезали) в каких-то точках цепи. Так что  $I = I_1 = I_2$ .

Далее: работа сил электрического поля над любым зарядом при перемещении его из  $A$  в  $B$  будет равна сумме работ электрических сил над этим зарядом, совершаемых силами поля при его перемещении в каждом проводнике.

Отсюда следует, что напряжение на  $AB$  равно сумме напряжений на резисторах

$$U_{AB} = U_1 + U_2 = I \cdot (R_1 + R_2).$$

В эквивалентной схеме сила тока и напряжение «не заметили» замены  $R_1$  и  $R_2$  на  $R_{\text{экв}}$ . В этом случае по закону Ома  $U_{AB} = I \cdot R_{\text{экв}}$ . Из сопоставления двух последних равенств находим

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_2. \quad (13)$$

Этот результат легко обобщается на случай  $n$  последовательно соединённых резисторов  $R_1, R_2, \dots, R_n$ . В этом случае (рекомендуем лично выполнить соответствующий вывод):

$$R_{\text{экв}} = \sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

Рассмотрим теперь участок  $AB$  цепи, в котором резисторы с сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  соединены **параллельно** (см. рис. 4). Поставим вопрос: каким сопротивлением  $R_{\text{экв}}$ , подключённым между точками  $A$  и  $B$ , можно заменить параллельно соединённые  $R_1$  и  $R_2$  так, чтобы напряжение на участке  $AB$  и сила

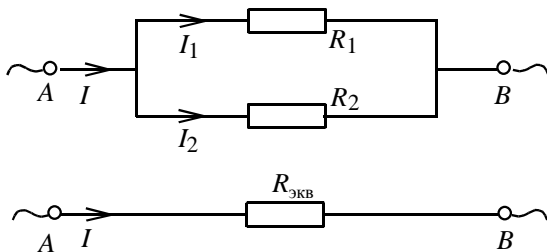


Рис. 4

тока, текущего к узлу  $A$  и вытекающего из узла  $B$  остались неизменными?

Для ответа на поставленный вопрос заметим, что при параллельном соединении проводников работа сил электрического поля в расчёте на единичный заряд (см. (3)) в проводниках одинакова (иначе нарушался бы закон сохранения энергии). Это означает, что напряжения на параллельно соединённых проводниках одинаковы. Обозначим его  $U_{AB}$ . Силу тока в каждом

проводнике определим по закону Ома:  $I_1 = \frac{U_{AB}}{R_1}$ ,  $I_2 = \frac{U_{AB}}{R_2}$ .

Далее, в любом узле, т. е. точке, где сходятся более двух проводов, по закону сохранения электрического заряда сумма токов, втекающих в узел, равна сумме токов, вытекающих из него. Отсюда следует, что в рассматриваемой задаче (рис. 4) сила  $I$  тока на входе и на выходе равна сумме сил токов в отдельных ветвях параллельной цепи:

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U_{AB}}{R_1} + \frac{U_{AB}}{R_2} = U_{AB} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

В эквивалентной схеме сила  $I$  тока и напряжение  $U_{AB}$  связаны с  $R_{\text{экв}}$  законом Ома (8)  $I = \frac{U_{AB}}{R_{\text{экв}}}$ . Два последних равенства справедливы при любых значениях, входящих в них величин  $I$  и  $U_{AB}$ , если

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (14)$$

Этот результат легко обобщается на случай  $n$  параллельно соединённых резисторов  $R_1, R_2, \dots, R_n$ . В этом случае

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

**Пример 12.** Между точками  $A$  и  $B$  электрической цепи подключены резисторы  $R_1 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 30 \text{ Ом}$ , как показано на рис. 5. Найдите эквивалентное сопротивление  $R_{AB}$  этого участка цепи.

**Решение.** Эквивалентное сопротивление  $R_{12}$  цепочки последовательно соединённых резисторов  $R_1$  и  $R_2$  найдём по формуле (13)

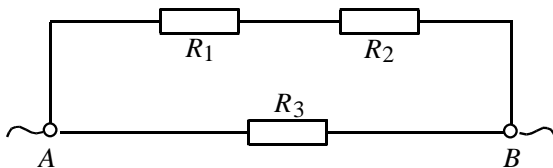


Рис. 5

$$R_{12} = R_1 + R_2.$$

Заменяя эти резисторы эквивалентным сопротивлением, получаем участок цепи, в котором к точкам  $A$  и  $B$  параллельно присоединены резисторы  $R_{12}$  и  $R_3$ . Тогда искомое эквивалентное сопротивление найдём из (14)

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_3},$$

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_{12}R_3}{R_{12} + R_3} = \frac{(R_1 + R_2)R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{(10 + 20)30}{10 + 20 + 30} = 15 \text{ Ом}.$$

**Пример 13.** Лестничная цепь состоит из последовательности  $N$  одинаковых звеньев (рис. 6 а). Последнее звено замкнуто резистором  $R$ . При какой величине отношения  $\frac{R}{r}$  сопротивление цепи не зависит от числа звеньев?

**Решение.** Сопротивление цепи не будет зависеть от числа звеньев, если эквивалентное сопротивление последнего звена (рис. 6 б) будет равно  $R$ . Из решения предыдущей задачи получаем:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r+R}.$$

Отсюда находим  $\frac{R}{r} = \frac{\sqrt{5}-1}{2} \approx 0,618$ .

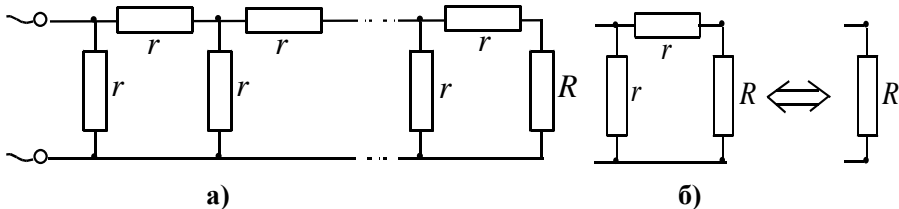


Рис. 6

## 2.7. Измерения силы тока и напряжения в электрических цепях. Амперметр и вольтметр

Для измерения токов и напряжений в электрических цепях используются амперметры и вольтметры, основным элементом которых служит гальванометр – прибор, предназначенный для измерения величин токов. Эти измерения могут быть основаны на одном из действий тока: тепловом, физическом, химическом. Гальванометр, градуированный на величину тока, называется амперметром. По закону Ома (8) напряжение и сила тока связаны прямо пропорциональной зависимостью, поэтому гальванометр можно градуировать и на напряжение. Такой прибор называют вольтметром.

В этом задании мы не будем касаться вопросов, связанных с конкретным устройством электроизмерительных приборов, с их системами и принципами работы. Остановимся лишь на требованиях, предъявляемых к внутренним сопротивлениям амперметров и вольтметров. *Важно, чтобы при включении в цепь для измерений эти приборы вносили как можно меньшее искажение в измеряемую величину.*

*Амперметр* включается в цепь последовательно. Если сопротивление амперметра  $R_a$  и его подключают к участку цепи с сопротивлением  $R_{\text{ц}}$  (рис. 7а), то эквивалентное сопротивление участка цепи и амперметра в соответствии с (13) равно  $R = R_{\text{ц}} + R_a = R_{\text{ц}} \left( 1 + \frac{R_a}{R_{\text{ц}}} \right)$ .

Отсюда следует, что амперметр не будет заметно изменять сопротивление участка цепи, если его собственное (внутреннее) сопротивление будет мало по сравнению с сопротивлением участка цепи.

Чтобы добиться этого, гальванометр снабжают шунтом (синоним – добавочный путь): вход и выход гальванометра соединяются некоторым сопротивлением, обеспечивающим параллельный гальванометру дополнительный путь для тока (рис. 7 б). Поэтому внутреннее сопротивление амперметра меньше, чем у применённого в нём гальванометра. (Читателю рекомендуется лично убедиться в этом с помощью соотношения (14).) Амперметр называется идеальным, если его внутреннее сопротивление можно считать равным нулю.

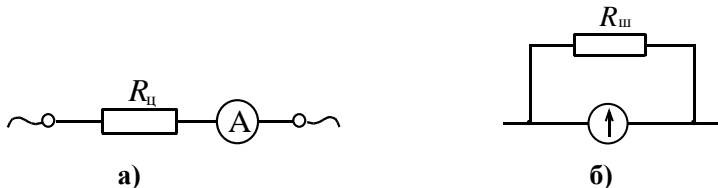


Рис. 7

Вольтметр подключается к электрической цепи параллельно тому участку, напряжение на котором требуется измерить. Присоединив, например, вольтметр с сопротивлением  $R_B$  параллельно лампочке с сопротивлением  $R_L$  (рис. 8 а), получим участок цепи, эквивалентное сопротивление которого вычисляется по формуле (14)  $R = R_L \frac{R_B}{R_L + R_B}$ .

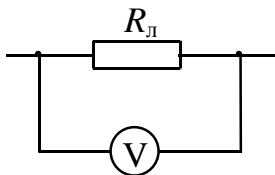


Рис. 8а

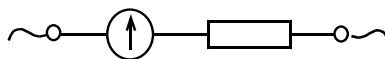


Рис. 8б

Отсюда следует, что чем больше сопротивление вольтметра по сравнению с сопротивлением лампочки, тем меньше эквивалентное сопротивление будет отличаться от сопротивления лампочки. Вывод: чтобы процесс измерения меньше искажал значение измеряемого напряжения, собственное (внутреннее) сопротивление вольтметра должно быть как можно больше. Поэтому в вольтметре последовательно гальванометру включают некоторое сопротивление (рис. 8б). Внутреннее сопротивление такого вольтметра, как правило, во много раз больше сопротивления входящего в него гальванометра. Вольтметр называется идеальным, если его внутреннее сопротивление можно считать бесконечно большим.

Каждый измерительный прибор рассчитан на определённый интервал значений измеряемой величины. И в соответствии с этим проградуирована его шкала. Для расширения пределов измерений в амперметре можно использовать добавочный шунт, а в вольтметре – добавочное сопротивление. Найдём значения этих сопротивлений, увеличивающих максимальную измеряемую величину тока или напряжения в  $n$  раз.

### 2.8. Шунт к амперметру

Если амперметр рассчитан на силу тока  $I_m$ , а с его помощью необходимо измерять силу тока в  $n$  раз большую (см. рис. 9), то в этом случае, подключив параллельно амперметру шунт, разделим ток силой  $nI_m$  на два тока: один из них силой  $I_m$  будет течь через амперметр, тогда через шунт будет протекать ток силой  $I_{ш} = (n-1)I_m$ . Поскольку шунт включён параллельно амперметру, то напряжения на шунте  $U_{ш} = (n-1)I_m R_{ш}$  и амперметре  $U_a = I_m R_a$  равны. Из равенства напряжений

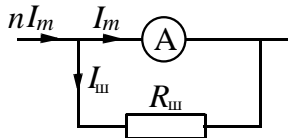


Рис. 9

$$I_m R_a = (n-1)I_m R_{ш}$$

находим

$$R_{ш} = \frac{R_a}{n-1}. \tag{15}$$

### 2.9. Добавочное сопротивление к вольтметру

Если вольтметр рассчитан на максимальное напряжение  $U_{max}$ , а с его помощью необходимо измерять напряжение, в  $n$  раз большее, то, подключив последовательно с вольтметром добавочное сопротивление  $R_2$  (рис. 10), разделим напряжение  $n \cdot U_{max}$  на два складываемых: одно из них – это напряжение  $U_{max}$  на вольтметре, второе – напряжение  $(n-1)U_{max}$  на добавочном сопротивлении.

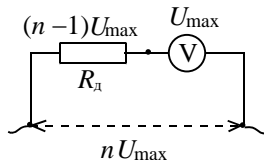


Рис. 10

Поскольку добавочное сопротивление включено последовательно с вольтметром, то через вольтметр и добавочное сопротивление течёт одинаковый ток, т. е. справедливо равенство

$$\frac{U_{max}}{R_b} = \frac{(n-1)U_{max}}{R_d}.$$

Отсюда

$$R_d = (n - 1)R_v. \quad (16)$$

**Пример 14.** Шкала гальванометра имеет  $N = 100$  делений, цена деления  $\delta = 1$  мкА. Внутреннее сопротивление гальванометра  $R_G = 1,0$  кОм. Как из этого прибора сделать вольтметр для измерения напряжений до  $U = 100$  В или амперметр для измерения токов силой до  $I = 1$  А?

**Решение.** Максимально допустимый ток  $I_{\max}$  через гальванометр равен цене деления, умноженной на число делений:  $I_{\max} = \delta \cdot N = 1 \cdot 100 = 100$  мкА. При максимальном токе напряжение на приборе максимально и по закону Ома (8) равно

$$U_{\max} = I_{\max} \cdot R_G = 10^{-4} \cdot 10^3 = 0,1 \text{ В.}$$

Для использования этого гальванометра в качестве амперметра для измерения токов силой до  $I = 1$  А необходимо параллельно с ним включить шунт, сопротивление которого найдём по формуле (15):

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_G}{n - 1} = \frac{R_G}{\frac{I}{I_{\max}} - 1} = \frac{10^3}{\frac{1}{10^{-4}} - 1} \approx 0,1 \text{ Ом.}$$

В этом случае максимальному отклонению стрелки на шкале гальванометра соответствует ток в цепи силой  $I = 1$  А.

Для использования этого гальванометра в качестве вольтметра для измерения напряжений до  $U = 100$  В необходимо последовательно с ним включить добавочное сопротивление, величину которого найдём из (16):

$$R_d = \left( \frac{U}{U_{\max}} - 1 \right) R_G = \left( \frac{100}{0,1} - 1 \right) \cdot 10^3 = 999 \text{ кОм.}$$

В этом случае максимальному отклонению стрелки на шкале гальванометра соответствует напряжение между точками подключения  $U = 100$  В.

**Пример 15.** Для измерения сопротивления  $R$  проводника собрана электрическая цепь, показанная на рис. 11. Вольтметр  $V$  показывает напряжение  $U_V = 5$  В. Показание амперметра  $A$  равно  $I_A = 25$  мА. Найдите величину  $R$  сопротивления проводника. Внутреннее сопротивление вольтметра  $R_V = 1,0$  кОм.

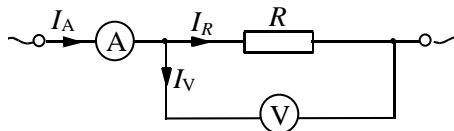


Рис. 11

Внутреннее сопротивление амперметра  $R_A = 2,0$  Ом.

**Решение.** Ток  $I_A$ , протекающий через амперметр, равен сумме токов  $I_V$  и  $I_R$ , протекающих через вольтметр и амперметр соответственно. Напряжения на резисторе  $U_R = I_R \cdot R$  и вольтметре  $U_V = I_V \cdot R_V$  одинаковы и равны показанию  $U_V$  вольтметра. Таким образом, приходим к системе уравнений

$$\begin{cases} I_A = I_V + I_R, \\ U_V = I_V \cdot R_V = I_R \cdot R, \end{cases}$$

решение которой

$$R = \frac{U_V}{I_A - \frac{U_V}{R_V}} = \frac{5}{25 \cdot 10^{-3} - \frac{5}{10^3}} = 250 \text{ Ом}$$

определяет величину  $R$  сопротивления проводника по результатам измерений. Заметим, что для приведённой схемы величина внутреннего сопротивления амперметра оказалась несущественной:  $R_A$  не входит в ответ.

### Контрольные вопросы и упражнения

#### 1. Перечислите *свойства электрических зарядов*.

Может ли отношение зарядов быть в точности равным  $\frac{q_1}{q_2} = -\left(\frac{5}{4} + \frac{1}{\sqrt{3}}\right)$ ?

Какому фундаментальному свойству заряда формально противоречит приведённое отношение? *Примечание:* с таким значением отношения зарядов Читатель может встретиться в решении некоторых задач по физике.

#### 2. Опишите способы *электризации тел*.

*Упражнение.* Пластмассовый шарик, потёртый о шерсть, приобретает заряд  $Q = -0,8 \cdot 10^{-9}$  Кл. Сколько электронов переходит при этом с шерсти на шарик?

#### 3. Сформулируйте *закон сохранения электрического заряда*.

Если система шарик + шерсть (см. предыдущий вопрос) изолирована от других тел, то каким будет заряд ткани?

#### 4. Что такое *электрическое поле*?

5. Приведите определение *электрического тока*. Какая договоренность принята для определения *направления электрического тока*?



6. Приведите определения: количественной меры направленного движения зарядов – **силы тока** и **плотности** тока. В каких единицах эти величины измеряют в СИ?

*Упражнение.* Экспериментально установлено, что через некоторую клеточную мембрану за время  $T = 2,0$  мкс проходит  $N = 500$  ионов натрия, заряд каждого из которых равен элементарному. Вычислите силу  $I$  тока, текущего через мембрану. Считая площадь поверхности мембраны равной  $S = 150$  мкм<sup>2</sup>, вычислите плотность  $j$  такого тока.

7. Приведите определение **электрического напряжения** между точками цепи. В каких единицах измеряют эту величину в СИ?

*Упражнение.* При ударе молнии на Землю переносится заряд  $Q = 8$  Кл под напряжением  $U = 5,0 \cdot 10^6$  В. Какую работу  $A$  совершают в этом процессе силы электрического поля? Какую массу  $m$  воды, взятой при  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ , можно довести до кипения при атмосферном давлении  $p = 1,0 \cdot 10^5$  Па, если такое количество теплоты подвести к воде? Удельная теплоёмкость воды  $c = 4,2 \cdot 10^3$  Дж/(кг $\cdot$ °C).

8. Приведите выражение для **мощности сил электрического поля в проводнике с током**.

Что показывает домашний электросчётчик: *потребляемую* мощность или *потреблённую* энергию?

В каких коммерческих единицах эта величина измеряется? Представьте эту коммерческую единицу в единицах СИ.

9. Какие физические величины связаны **законом Джоуля – Ленца**?

*Упражнение.* Электрический нагреватель потребляет ток силой  $I = 15$  А от сети с напряжением  $U = 120$  В. Вычислите потребляемую нагревателем мощность  $P$ . В какую цену обойдётся эксплуатация нагревателя в течение месяца (30 суток), если его ежедневно включать на  $T = 3$  часа, а тариф составляет 3 руб/кВт $\cdot$ ч?

10. Сформулируйте **закон Ома**. Постройте график зависимости  $I(U)$  для проводника, подчиняющегося закону Ома.

Каким образом сопротивление  $R$  проводника связано с наклоном построенной зависимости?

**11.** Какую зависимость сопротивления проводника от его размеров и свойств вещества установил Г. Ом?

*Упражнение.* Стороны медного параллелепипеда равны  $a = 1$  см,  $b = 2$  см,  $c = 3$  см. К каким противоположным граням следует подсоединить выводы, чтобы электрическое сопротивление было: а) минимальным, б) максимальным? Вычислите сопротивления  $R_{\min}$  и  $R_{\max}$ . Удельное сопротивление меди  $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

**12.** Как вычисляется *эквивалентное сопротивление* при последовательном и параллельном соединении проводников?

*Упражнение.* Допустим, что в Вашем распоряжении четыре резистора с сопротивлением  $R = 10$  Ом каждый. Как следует соединить эти резисторы, чтобы сопротивление полученной цепочки было равно:

а)  $R_1 = 25$  Ом, б)  $R_2 = 6$  Ом?

Ответ подкрепите схемой соединения и вычислением эквивалентного сопротивления в каждом случае.

**13.** Приведите пример цепи, которая не сводится к комбинации последовательных и параллельных соединений.

**14.** В каких случаях параллельно амперметру присоединяют шунт, а к вольтметру последовательно присоединяют добавочное сопротивление?

### Задачи

**1.** Медная монетка массой  $m = 3$  г обладает положительным зарядом  $Q = 1,12$  мкКл. Какую долю  $\delta$  свободных электронов потеряла монетка? Необходимые данные заимствуйте из Примера № 3 настоящего Задания.

**2.** Два одинаковых металлических шарика, заряды которых  $q_1 > q_2 > 0$ , привели в соприкосновение, при этом заряд второго шарика увеличился на 60%. Найдите отношение  $\frac{q_1}{q_2}$  начальных зарядов шариков.

**3.** Электромотор крана приводится в движение от сети с напряжением  $U = 220$  В. При подъёме груза сила тока, протекающего через мотор,  $I = 11$  А. Сопротивление обмотки мотора  $R = 2$  Ом. Найдите массу  $M$  груза, который движется по вертикали со скоростью  $V = 0,5$  м/с.

**4.** В медном проводе площадью поперечного сечения  $S = 0,2$  см<sup>2</sup> сила тока  $I = 200$  А. Вычислите дрейфовую скорость  $V$ , с которой движутся электроны в медном проводнике. Необходимые величины заимствуйте из Примера № 3 настоящего Задания.

5. В схеме на рис.12 сопротивление  $r$  — известная величина. Найдите величину  $R$ , если известно, что сопротивление между точками  $AB$  равно сопротивлению между точками  $AC$ . Для решения воспользуйтесь Указанием на стр. 28.

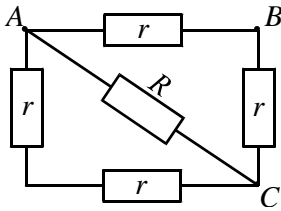


Рис. 12

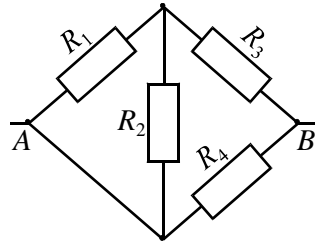


Рис. 13

6. Сопротивления  $R_1 = 3\text{ Ом}$ ,  $R_2 = 6\text{ Ом}$ ,  $R_3 = 1\text{ Ом}$ ,  $R_4 = 3\text{ Ом}$  соединены как показано на рис 13. На каком сопротивлении выделяется наибольшая мощность при подаче напряжения на клеммы  $AB$ ? Вычислите эту мощность  $P_{\text{max}}$ , если  $U_{AB} = 10\text{ В}$ .

7. Амперметр и вольтметр соединены последовательно и подключены к источнику постоянного напряжения  $U = 12\text{ В}$ . Если параллельно вольтметру подключить резистор, то показание амперметра увеличивается в 2 раза, а показание вольтметра уменьшается в 2 раза. Найдите показание  $U_1$  вольтметра до подключения резистора.

8. Какое сопротивление  $R$  следует соединить параллельно с сопротивлением  $r$  (рис. 14), если известно, что эквивалентное сопротивление полученной схемы равно  $R$ ? Для решения воспользуйтесь Указанием на стр. 28.

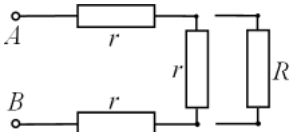


Рис. 14

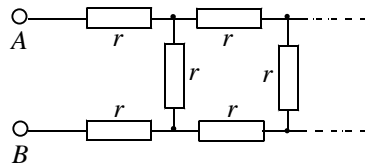


Рис. 15

9. Электрическая цепь состоит из очень большого числа одинаковых звеньев, содержащих три сопротивления  $r = 1\text{ Ом}$  (см. рис. 15, на котором таких звеньев два). Определите сопротивление  $R_{\infty}$  цепи между точками  $A$  и  $B$ , если количество звеньев очень велико, т.е. цепочка бесконечная. Какое напряжение  $U$  следует приложить к цепи, чтобы сила тока в первом сопротивлении — перемычке была равна  $I = 1\text{ А}$ ?

**10.** Если к амперметру, рассчитанному на максимальную величину тока  $I_1 = 2$  А, присоединить параллельно сопротивление  $r = 0,5$  Ом, то его можно использовать для измерения токов до  $I_2 = 20$  А. Какое минимальное добавочное сопротивление  $R$  необходимо соединить последовательно с амперметром (после удаления сопротивления  $r$ ), чтобы такой прибор можно было использовать в качестве вольтметра для измерения напряжений до  $U = 220$  В?

*Указание:* корни  $X_1, X_2$  уравнения  $X^2 + pX + q = 0$  находим по формуле

$$X_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}.$$