

В. А. Касьянов

ФИЗИКА

Учебник

Рекомендовано
Министерством просвещения
Российской Федерации

7-е издание, переработанное

МОСКВА



2019

УГЛУБЛЁННЫЙ УРОВЕНЬ

11

к л а с с



р оссийский
учебник

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72
К28

**Одобрено Научно-редакционным советом корпорации
«Российский учебник» под председательством академиков
Российской академии наук В. А. Тишкова и В. А. Черешнева**

Касьянов, В. А.

К28 Физика. Углублённый уровень. 11 класс : учебник / В. А. Касьянов. — 7-е изд., перераб. — М. : Дрофа, 2019. — 493, [3] с. : ил., 7 л. цв. вкл. — (Российский учебник).

ISBN 978-5-358-17564-8

Учебник предназначен учащимся 11 классов, в которых физика изучается на углублённом уровне, и является продолжением учебника «Физика. Углублённый уровень. 10 класс» того же автора.

Учебник соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту среднего общего образования. Включён в Федеральный перечень учебников в составе завершённой предметной линии.

Книга создана с учётом современных научных представлений, включает следующие разделы: «Электродинамика», «Электромагнитное излучение», «Физика высоких энергий», «Элементы астрофизики».

Достоинством учебника является тщательно разработанный методический аппарат, включающий вопросы, задачи различной степени сложности, творческие задания, описания лабораторных работ. Книга хорошо иллюстрирована.

К учебнику изданы тетради для контрольных работ и дидактические материалы. Раздел «Лабораторные работы» подготовлен при участии Г. Г. Никифорова. Творческие задания составлены О. А. Крысановой и Н. В. Ромашкиной.

**УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72**

ISBN 978-5-358-17564-8

© ООО «ДРОФА», 2014
© ООО «ДРОФА», 2019, с изменениями

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

1

Постоянный электрический ток

§ 1. Электрический ток

Электрические заряды в движении. Гравитационное притяжение испытывают все тела и частицы. Структура Вселенной формируется гравитационным притяжением тел огромных масс. Неограниченное гравитационное сжатие предотвращает движение этих тел.

Существование тел конечных размеров оказывается возможным потому, что между частицами вещества действуют более мощные, чем гравитационные, силы электромагнитной природы: притяжения и отталкивания, которые могут уравновесить друг друга. Как мы выяснили ранее (см. учебник В. А. Касьянова «Физика. Углублённый уровень. 10 класс», § 80), система неподвижных (статических) электрических зарядов не может быть устойчивой. Устойчивой может быть лишь система движущихся зарядов. В этой главе мы рассмотрим электромагнитное поле движущихся электрических зарядов. Движущийся электрический заряд является источником электромагнитного поля, которое распространяется в пространстве со скоростью света.

Изменить энергию электромагнитного взаимодействия зарядов можно, например, приближая один заряд к другому или удаляя их друг от друга.

Движение зарядов в проводнике. Направленное движение зарядов в проводнике приводит к переносу энергии электромагнитного поля в пространстве.

Электрический ток — упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц.

Для существования электрического тока необходимы прежде всего свободные заряды — носители заряда, например заряженные частицы: положительные и отрицательные ионы, электроны.

В таких проводниках, как металлы, концентрация свободных зарядов (электронов) велика, и они могут перемещаться по всему объёму проводника, не покидая его пределов. Поэтому для передачи энергии электромагнитного поля из одной точки пространства в другую используют металлические проводники, подобно тому как для транспортировки воды применяют трубы.

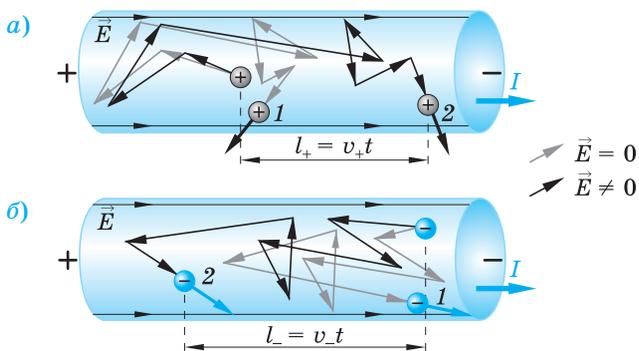
Направленное движение свободных зарядов в проводнике возможно под действием *внешнего электрического поля* (второе условие существования электрического тока).

В отсутствие внешнего электрического поля (его напряжённость $\vec{E} = 0$) движение зарядов в проводнике является хаотическим (серая линия на рис. 1).

Так движутся, например, положительные и отрицательные ионы в электролитах, электроны в металлических проводниках. После нескольких столкновений с другими частицами заряженные частицы могут вернуться практически к первоначальному положению.

В том случае, когда к проводнику приложено внешнее электрическое поле ($\vec{E} \neq 0$), на заряды действует дополнительно кулоновская сила, заставляющая заряды одного знака двигаться по проводнику в одном направлении. Положительные заряды приобретают составляющую скорости v_+ вдоль напряжённости электрического поля (направленную скорость). За промежуток времени t положительный заряд «дрейфует» на расстояние $l_+ = v_+ t$ в направлении напряжённости электрического поля (чёрная линия на рис. 1). Отрицательный заряд смещается на расстояние $l_- = v_- t$ (v_- — скорость дрейфа в направлении, противоположном напряжённости электрического поля).

В проводнике, помещённом в электрическое поле, происходит наложение упорядоченного движения зарядов на хаотическое тепловое.



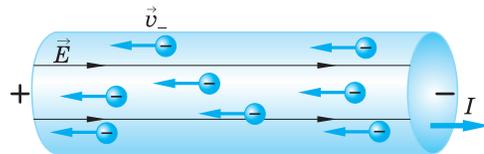
1

Движение носителей зарядов в проводнике. Наложение упорядоченного движения зарядов на хаотическое тепловое движение в электрическом поле: а — положительных; б — отрицательных

За направление тока принимают направление упорядоченного движения положительно заряженных частиц.

Направление тока совпадает с направлением напряжённости электрического поля, вызывающего этот ток.

В металлах, где носителями заряда являются свободные отрицательные заряженные электроны, направление тока считается противоположным направлением скорости их упорядоченного движения (рис. 2).



▲ 2

Направление тока в металлическом проводнике противоположно направлению движения электронов

В О П Р О С Ы

1. При каких условиях возникает электрический ток?
2. Какие частицы могут быть носителями электрического заряда в металле, в растворе электролита, в газе?
3. Почему движение заряженных частиц в проводнике в отсутствие внешнего электрического поля является хаотическим?
4. Чем отличается движение заряженных частиц в проводнике в отсутствие и при наличии внешнего электрического поля?
5. Как выбирается направление электрического тока? В каком направлении движутся электроны в металлическом проводнике, по которому протекает электрический ток?

§ 2. Сила тока

Определение силы тока. Интенсивность направленного движения заряженных частиц в проводнике характеризует величина электрического заряда, проходящего через поперечное сечение проводника за 1 с, или *сила тока*. Эта величина может меняться с течением времени.

Сила тока в данный момент времени — скалярная физическая величина, равная пределу отношения электрического заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника, к промежутку времени его прохождения:

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (1)$$

Формула (1) в математике представляет собой производную. Поэтому

$$I = \frac{dq}{dt} = q'. \quad (2)$$

Сила тока — производная по времени от заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за промежуток времени t .

Единица силы тока (основная единица СИ) — *ампер* (А):

$$1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с.}$$

Точное определение ампера будет дано в § 25.

Связь силы тока с направленной скоростью. Для того чтобы рассчитать силу тока, найдём заряд Δq , протекающий через поперечное сечение проводника за промежуток времени Δt (рис. 3). За это время через сечение проводника пройдут только заряды, движущиеся со скоростью v сонаправленно с напряжённостью внешнего электрического поля, которые находятся внутри цилиндра, площадь сечения которого S и образующая $\Delta l = v\Delta t$. Зная концентрацию n заряженных частиц (число зарядов в единице объёма), можно найти число заряженных частиц в этом объёме $N = nSv\Delta t$ и определить их заряд:

$$\Delta q = q_0 N = q_0 n S v \Delta t,$$

где q_0 — заряд одной частицы.

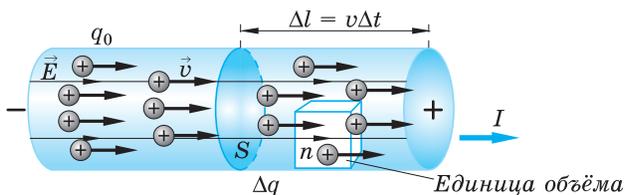
Из формулы (1) следует, что сила тока

$$I = q_0 n S v. \quad (3)$$

Если скорость движения зарядов не зависит от времени, т. е. $v = \text{const}$, то сила тока $I = \text{const}$.

Постоянный электрический ток — ток, сила тока и направление которого не изменяются с течением времени.

Постоянный ток широко используется на транспорте, в электрических схемах автомобилей, в электрометаллургии, микроэлектронике и т. д.



3

Движение
положительных
зарядов в проводнике
(электролите)

В О П Р О С Ы

1. Какая величина характеризует интенсивность направленного движения заряженных частиц?
2. Дайте определение силы тока.
3. Как сила тока связана с зарядом, прошедшим за время t через поперечное сечение проводника?
4. Как называется единица силы тока в СИ?
5. Какой электрический ток называют постоянным? Как сила тока зависит от концентрации заряженных частиц?

З А Д А Ч И

1. Какой заряд пройдёт через поперечное сечение проводника за 1 мин, если сила тока в проводнике 2 А?
2. Сколько электронов проходит через спираль лампы накаливания за 1 с при силе тока в лампе 1,6 А?
3. Сила тока, протекающего по проводнику в течение года, равна 1 А. Найдите массу электронов, прошедших за этот промежуток времени сквозь поперечное сечение проводника. Отношение заряда электрона к его массе $e/m_e = 1,76 \cdot 10^{-11}$ Кл/кг.
4. В проводнике, площадь поперечного сечения которого 1 мм², сила тока 1,6 А. Концентрация электронов в проводнике 10^{28} м⁻³ при температуре 20 °С. Найдите среднюю скорость направленного движения электронов и сравните её с тепловой скоростью электронов.
5. За 4 с сила тока в проводнике линейно возросла от 1 до 5 А. Постройте график зависимости силы тока от времени. Какой заряд прошёл через поперечное сечение проводника за это время?

§ 3. Источник тока

Условие существования постоянного тока в проводнике. Рассмотрим условие существования постоянного тока в проводнике. При помещении проводника во внешнее постоянное электрическое поле в нём происходит перераспределение свободных зарядов, называемое *электростатической индукцией* (см. Ф-10, § 88).

Электрическое поле индуцированных (наведённых) зарядов достаточно быстро компенсирует внешнее поле. Напряжённость поля внутри проводника становится равной нулю, заряды перестают двигаться направленно, ток прекращается. Для того чтобы ток существовал непрерывно, необходимо создание и поддержание в проводниках электрического поля. Напряжённость внешнего поля должна быть больше напряжённости поля индуцированных зарядов. Для этого необходимо иметь устройст-

во — *источник тока*, которое непрерывно генерирует заряды и перемещает их в направлении, противоположном направлению кулоновских сил.

Источник тока — устройство, разделяющее положительные и отрицательные заряды.

Гальванический элемент. Разделение зарядов возможно в результате преобразования механической, тепловой, химической, световой энергии в электрическую. Так, в гальваническом элементе заряды на электродах оказываются разноимёнными за счёт энергии химической реакции между электродами и электролитом.

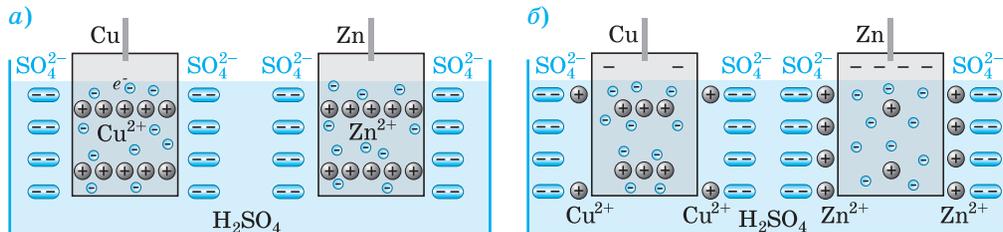
В элементе Вольта в раствор серной кислоты (H_2SO_4) погружены медный (Cu) и цинковый (Zn) электроды. Отрицательные ионы SO_4^{2-} , находящиеся в растворе вблизи электронейтральных медного и цинкового электродов, притягивают ионы Cu^{2+} и Zn^{2+} , располагающиеся в узлах кристаллической решётки (рис. 4, а). Энергия притяжения разноимённых ионов превосходит энергию связи ионов Cu^{2+} и Zn^{2+} в кристаллической решётке металлических электродов, поэтому эти ионы переходят в раствор.

Кинетическая энергия $(E_k)_{\text{Cu}^{2+}}$ ионов Cu^{2+} , переходящих в раствор, оказывается меньше кинетической энергии $(E_k)_{\text{Zn}^{2+}}$ ионов Zn^{2+} , так как энергия связи E_{Cu} ионов меди Cu^{2+} в кристаллической решётке превышает энергию связи E_{Zn} ионов Zn^{2+} (рис. 5):

$$(E_k)_{\text{Cu}^{2+}} = E_{\pm} - E_{\text{Cu}}, \quad (E_k)_{\text{Zn}^{2+}} = E_{\pm} - E_{\text{Zn}},$$

где E_{\pm} — энергия ионов в растворе.

Чем больше положительных ионов переходит в раствор, тем большим становится по модулю отрицательный заряд электрода (рис. 4, б), что

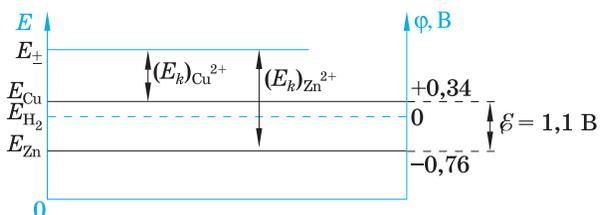


▲ 4

Перераспределение зарядов в гальваническом элементе Вольта

5

Электродвижущая сила гальванического элемента Вольта



препятствует выходу из него других ионов. Растворение электродов прекращается, если кинетическая энергия положительных ионов оказывается недостаточной для преодоления разности потенциалов двойного электрического слоя. Этот слой образован положительными зарядами ионов в растворе и отрицательными избыточными зарядами электродов:

$$(E_k)_{Cu^{2+}} = q_0\phi_{Cu}, \quad (E_k)_{Zn^{2+}} = q_0\phi_{Zn},$$

где ϕ_{Cu} и ϕ_{Zn} — потенциалы медного и цинкового электродов относительно раствора.

Обычно за нуль отсчёта энергии связи принимают энергию E_{H_2} , необходимую для ионизации газообразного молекулярного водорода. Соответственно в качестве нуля отсчёта потенциала электродов принят потенциал на так называемом *водородном электроде* (см. ось ϕ на рис. 5). Водородный электрод образуется газообразным водородом, находящимся вблизи химически нейтральной платины.

Потенциалы на электродах, отсчитываемые относительно водородного электрода, называют *нормальными электродными потенциалами*.

Нормальные электродные потенциалы для некоторых металлов приведены в таблице 1.

ЭДС гальванического элемента. Между медным и цинковым электродами возникает постоянное напряжение, равное разности нормальных потенциалов (см. рис. 5):

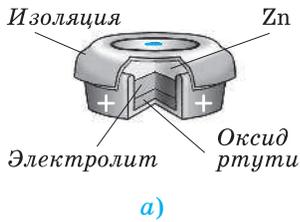
$$\mathcal{E} = \phi_{Cu} - \phi_{Zn} = 0,34 - (-0,76) = 1,1 \text{ (В)},$$

называемое *электродвижущей силой гальванического элемента Вольта* или ЭДС.

Медный электрод, имеющий больший потенциал, оказывается положительным полюсом источника — *анодом*, а цинковый — отрицатель-

Таблица 1
Нормальные электродные потенциалы

Металл	ϕ , В
Литий	-3,0
Калий	-2,9
Натрий	-2,7
Алюминий	-1,7
Цинк	-0,76
Железо	-0,44
Олово	-0,14
Свинец	-0,13
Медь	+0,34
Ртуть	+0,80
Серебро	+0,80
Платина	+1,2
Золото	+1,3



ным — *катодом*. Используя данные таблицы 1, можно аналогично рассчитать ЭДС элемента с парой электродов из других металлов. Наиболее распространённые элементы — источники тока — изображены на рисунке 6. Ртутная батарейка¹ (рис. 6, *а*), используемая в часах, калькуляторах и слуховых аппаратах, даёт ЭДС около 1,4 В. Традиционная батарейка для карманных фонарей (рис. 6, *б*) имеет ЭДС 1,5 В.

ВОПРОСЫ

1. Почему электростатическая индукция препятствует существованию постоянного тока в проводнике?
2. Что такое источник тока? Какова его роль в электрической цепи?
3. Что такое гальванический элемент? Почему происходит разделение зарядов в гальваническом элементе?
4. Когда прекращается растворение электродов в растворе электролита?
5. Что такое нормальный электродный потенциал? Чему равна разность потенциалов на зажимах гальванического элемента?

▲ 6

Источники тока:
а — ртутная батарейка;
б — батарейка для карманного фонаря

§ 4. Источник тока в электрической цепи

Сторонние силы. При соединении проводником электродов (полюсов) источника тока по проводнику под действием постоянной разности потенциалов протекает электрический ток. Движущиеся от катода к аноду по проводнику электроны уменьшают разность потенциалов между электродами, унося отрицательный заряд с катода и нейтрализуя положительный на аноде. Для поддержания постоянной разности потенциалов заряды должны накапливаться на полюсах источника: положительные заряды в электролите должны двигаться к аноду, а отрицательные — к катоду. Такое движение в направлении, противоположном действию кулоновских сил отталкивания между одноимёнными

¹ Сегодня ртутные батарейки стараются заменить серебряно-цинковыми, чтобы ограничить применение вредных веществ.

зарядами, может происходить лишь под действием непотенциальных сил, называемых *сторонними силами*.

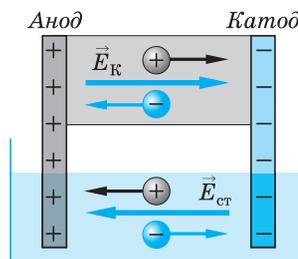
Сторонние силы — силы неэлектростатического происхождения, вызывающие разделение зарядов в источнике тока.

Происхождение сторонних сил может быть различным. В гальваническом элементе, например, сторонние силы возникают за счёт химической реакции между электродами и электролитом (рис. 7).

Движение заряженных частиц в источнике тока. Выясним особенности движения заряженных частиц в источнике тока. В качестве примера рассмотрим гальванический элемент, поддерживающий постоянный электрический ток в проводнике, присоединённом к его полюсам (рис. 8, а).

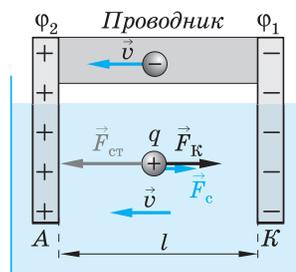
Положительно заряженная частица (ион) движется в электролите гальванического элемента от катода к аноду под действием сторонней силы $\vec{F}_{ст}$. Кроме того, на эту частицу действуют в направлении, противоположном скорости её движения, сила Кулона $\vec{F}_К$ со стороны электродов и сила сопротивления $\vec{F}_с$. Сила сопротивления характеризует противодействие движению заряженной частицы со стороны ионов, с которыми она сталкивается в процессе движения в электролите. Достигая электрода, заряженная частица увеличивает его заряд. Благодаря этому между электродами поддерживается постоянная разность потенциалов U .

Роль источника тока в электрической цепи подобна роли насоса для перекачивания жидкости (рис. 8, б). Течение жидкости из верхнего резервуара по наклонной трубе под действием силы тяжести сопровождается потерями энергии на трение. Поэтому для циркуляции жидкости в системе требуется насос, сообщаящий жидкости

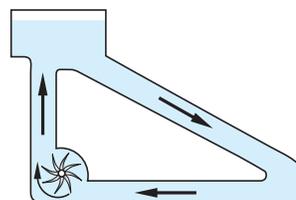


▲ 7

Возникновение сторонних сил в гальваническом элементе



а)



б)

▲ 8

Аналогия между действием источника тока и водяного насоса:

а — силы, действующие на заряженную частицу в гальваническом элементе;
б — водяной насос

дополнительную скорость, необходимую для её возвращения в резервуар. Сторонней силой в этом случае является сила давления на воду вращающейся крыльчатки насоса.

ЭДС источника тока. Изменение потенциальной энергии заряда при его перемещении между электродами источника тока равно суммарной работе сторонней силы и силы сопротивления (см. Ф-10, формула (92)):

$$\Delta W = A_{\text{ст}} + A_{\text{с}}. \quad (4)$$

Чем больший заряд перемещается в источнике тока, тем большая работа совершается сторонними силами. Отношение работы сторонних сил к переносимому заряду является постоянной величиной для данного источника тока, называемой *электродвижущей силой (ЭДС)*.

ЭДС — скалярная физическая величина, равная отношению работы сторонних сил по перемещению положительного заряда от отрицательного полюса источника тока к положительному к величине этого заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (5)$$

ЭДС численно равна работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда между полюсами источника тока.

Единица электродвижущей силы — *вольт (В)*:

$$1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл.}$$

Так как изменение потенциальной энергии заряда связано с разностью потенциалов U между электродами $\Delta W = qU$, то формулу (4) можно представить в виде

$$U = \mathcal{E} - \frac{|A_{\text{с}}|}{q}. \quad (6)$$

При получении этого выражения мы учли, что работа силы сопротивления отрицательна, так как эта сила направлена противоположно перемещению заряда. Из формулы (6) видно, что *разность потенциалов между полюсами источника тока (напряжение), приложенная к подключённому к полюсам проводнику, меньше ЭДС*. Напряжение на участке, содержащем источник тока, равно сумме ЭДС источника и разности потенциалов на этом участке.

Если полюсы источника разомкнуты, ток через источник не протекает, а работа силы сопротивления равна нулю. Следовательно,

$$\mathcal{E} = U.$$

ЭДС равна напряжению между полюсами разомкнутого источника тока.

В О П Р О С Ы

1. Какие силы называют сторонними? Почему накопление зарядов на полюсах источника может происходить лишь под действием сторонних сил?
2. Опишите особенности движения заряженной частицы в электролите источника тока.
3. Дайте определение ЭДС. В каких единицах она измеряется?
4. Почему разность потенциалов между полюсами источника тока, замкнутого проводником, меньше ЭДС?
5. Может ли напряжение источника равняться его ЭДС? Если да, то при каком условии?

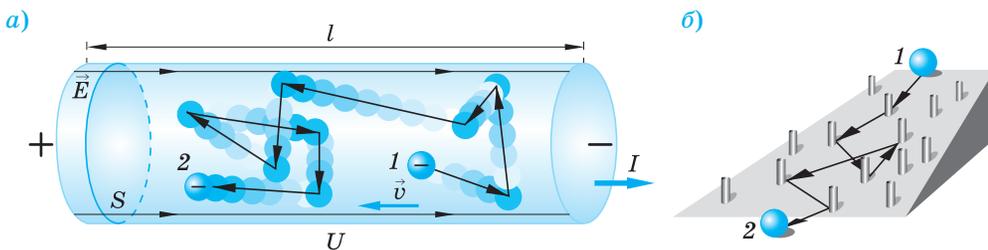
§ 5. Закон Ома для однородного проводника (участка цепи)

Зависимость силы тока в проводнике от приложенного к нему напряжения. Для существования тока в однородном проводнике необходимо создать разность потенциалов на его концах.

Однородным является проводник, в котором не действуют сторонние силы.

Для каждого проводника — твёрдого, жидкого, газообразного, плазменного — существует определённая зависимость силы тока от приложенной к нему разности потенциалов (или приложенного напряжения).

Получим зависимость силы тока от приложенного напряжения для металлического проводника. Предположим, что к металлическому проводнику длиной l и площадью поперечного сечения S приложено напряжение U (рис. 9, а). Под действием электрического поля напряжённостью



▲ 9

Движение электрона в проводнике:

а — траектория движения электрона в проводнике;

б — моделирование движения электрона в проводнике

$E = U/l$ электроны, являющиеся носителями электрического заряда, приобретают постоянное ускорение в направлении, противоположном напряжённости:

$$a = \frac{F_k}{m_e} = \frac{eE}{m_e} = \frac{eU}{m_e l}.$$

Из-за столкновений с неоднородностями кристаллической решётки (возникающими, например, при образовании кристалла) или атомами примесей другого элемента в металле электроны движутся по сложной траектории. Она напоминает траекторию движения шарика, скатывающегося с наклонной плоскости под действием силы тяжести и сталкивающегося с выступающими цилиндрическими штырями (рис. 9, б). За промежуток времени τ_c между столкновениями электрон, движущийся равноускоренно, приобретает среднюю направленную скорость

$$v = \frac{a\tau_c}{2} = \frac{eU}{2m_e l} \tau_c. \quad (7)$$

Сила тока в проводнике, как следует из формулы (3), при $q_0 = e$

$$I = enSv. \quad (8)$$

Подставляя в это уравнение выражение для направленной скорости, получаем

$$I = \frac{ne^2\tau_c}{2m_e} \frac{S}{l} U. \quad (9)$$

Сила тока в однородном проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению.

Сопротивление проводника. Коэффициент пропорциональности между силой тока и напряжением обозначают $1/R$:

$$R = \frac{2m_e}{ne^2\tau_c} \frac{l}{S}, \quad (10)$$

где R — электрическое сопротивление проводника.

Единица сопротивления — *ом* (Ом):

$$1 \text{ Ом} = 1 \text{ В/А}.$$

Впервые зависимость силы тока от напряжения была экспериментально получена в 1826 г. немецким учёным **Георгом Ом**ом.

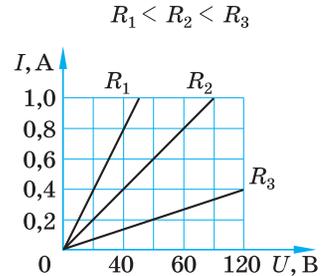
Закон Ома для однородного проводника (участка цепи)

Сила тока в однородном проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению проводника:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (11)$$

Зависимость силы тока в проводнике от приложенного к нему напряжения называют *вольт-амперной характеристикой проводника*.

На рисунке 10 приведены вольт-амперные характеристики проводников с различным электрическим сопротивлением.



В О П Р О С Ы

1. Какой проводник называют однородным? Почему направленное движение электрических зарядов в однородном проводнике является равноускоренным?
2. Приведите механическую аналогию движения заряженных частиц в проводнике.
3. Дайте определение напряжения. Во сколько раз изменится сила тока в проводнике при увеличении приложенного к нему напряжения вдвое?
4. Сформулируйте закон Ома для однородного проводника.
5. Что такое вольт-амперная характеристика проводника? Почему вольт-амперная характеристика для проводника с большим сопротивлением возрастает более полого, чем для проводника с меньшим сопротивлением?

▲ 10

Вольт-амперные характеристики проводников

З А Д А Ч И

1. Электрический обогреватель, имеющий сопротивление 44 Ом, включён в сеть с напряжением 220 В. Найдите силу тока, протекающего через обогреватель.
2. Найдите сопротивление резистора, если при напряжении 6 В сила тока в резисторе 2 мкА.
3. Определите разность потенциалов на концах проводника сопротивлением 5 Ом, если за минуту через его поперечное сечение пройдёт заряд 2,88 кКл.
4. К проводнику сопротивлением R приложена разность потенциалов U . За какой промежуток времени через поперечное сечение проводника пройдёт N электронов?