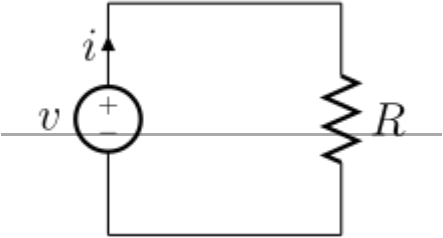


# Электрический ток

Электрический ток



Простая электрическая цепь, где ток обозначается буквой *i*.

Соотношение между напряжением (*V*), сопротивлением (*R*) и током (*i* или *I*) —  $V=IR$ ; это известно как закон Ома.

Общие символы	<i>I</i>
единица СИ	ампер
Выводы из других величин	$I = \frac{V}{R}, I = \frac{Q}{t}$
Измерение	<i>I</i>

Электрический **ток** — это поток заряженных частиц , <sup>[ 1 ] [ 2 ] [ 3 ]</sup> , таких как электроны или ионы , движущихся через электрический проводник или пространство. Он определяется как чистая скорость потока электрического заряда через поверхность. <sup>[ 4 ]</sup> : 2 <sup>[ 5 ]</sup> : 622 Движущиеся частицы называются носителями заряда , которые могут быть одним из нескольких типов частиц, в зависимости от проводника . В электрических цепях носителями заряда часто являются электроны, движущиеся по проводу . В полупроводниках это могут быть электроны или дырки . В электролите носителями заряда являются ионы , тогда как в плазме , ионизированном газе, это ионы и электроны. <sup>[ 6 ]</sup>

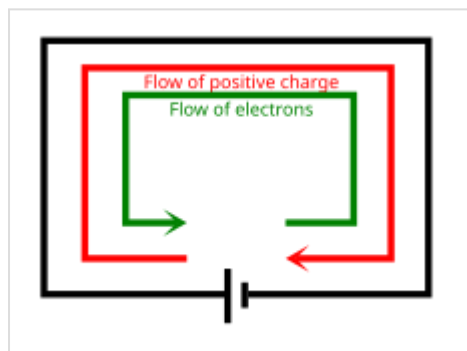
В Международной системе единиц (СИ) электрический ток выражается в единицах ампер ( иногда называемых «амп», символ A), что эквивалентно одному кулону в секунду. Ампер является базовой единицей СИ , а электрический ток является базовой величиной в Международной системе величин (ISQ). <sup>[ 7 ]</sup> : 15 Электрический ток также известен как **сила тока** и измеряется с помощью прибора, называемого амперметром . <sup>[ 5 ]</sup> : 788

Электрические токи создают магнитные силы , которые используются в двигателях, генераторах, индукторах и трансформаторах . <sup>[ 8 ] [ 9 ]</sup> В обычных проводниках они вызывают джоулев нагрев , который создает свет в лампах накаливания . Изменяющиеся во времени токи испускают электромагнитные волны , которые используются в телекоммуникациях для передачи информации. <sup>[ 10 ]</sup>

## Символ

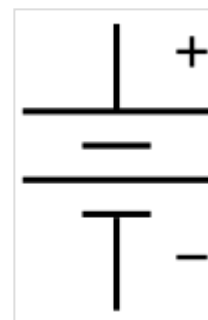
Общепринятый символ для тока —  $I$  , который происходит от французского выражения *intensité du courant* (сила тока). <sup>[ 11 ] [ 12 ]</sup> Силу тока часто называют просто *током* . <sup>[ 13 ]</sup> Символ  $I$  был использован Андре-Мари Ампером , в честь которого названа единица электрического тока, при формулировке закона силы Ампера (1820). <sup>[ 14 ]</sup> Обозначение перешло из Франции в Великобританию, где оно стало стандартным, хотя по крайней мере один журнал не переходил с использования  $C$  на  $I$  до 1896 года. <sup>[ 15 ]</sup>

## Конвенции



Электроны , носители заряда в электрической цепи, движутся в направлении , противоположном направлению обычного электрического тока.

Условное направление тока, также известное как условный ток , <sup>[ 16 ] [ 17 ]</sup> произвольно определяется как направление, в котором текут положительные заряды. В проводящем материале движущиеся заряженные частицы, составляющие электрический ток, называются носителями заряда . В металлах, из которых состоят провода и другие проводники в большинстве электрических цепей , положительно заряженные атомные ядра атомов удерживаются в фиксированном положении, а отрицательно заряженные электроны являются носителями заряда, свободно перемещающимися в металле. В других материалах, особенно в полупроводниках , носители заряда могут быть положительными *или* отрицательными, в зависимости от используемой примеси . Положительные и отрицательные носители заряда могут даже присутствовать одновременно, как это происходит в электролите в электрохимической ячейке .



Символ батареи на принципиальной схеме .

Поток положительных зарядов дает тот же электрический ток и имеет тот же эффект в цепи, что и равный поток отрицательных зарядов в противоположном направлении. Поскольку ток может быть потоком как положительных, так и отрицательных зарядов, или обоих, необходимо соглашение о направлении тока, которое не зависит от типа носителей заряда. Отрицательно заряженные носители, такие как электроны (носители заряда в металлических проводах и многих других компонентах электронной схемы), следовательно, текут в противоположном направлении обычного тока в электрической цепи. <sup>[ 16 ] [ 17 ]</sup>

## Направление отсчета

Ток в проводе или элементе цепи может течь в одном из двух направлений. При определении переменной *I* Чтобы представить ток, необходимо указать направление, представляющее положительный ток, обычно с помощью стрелки на принципиальной схеме цепи . <sup>[ 18 ] [ 19 ] : 13</sup> Это называется *опорным направлением* тока. *I*. При анализе электрических цепей фактическое направление тока через определенный элемент цепи обычно неизвестно до завершения анализа. Следовательно, опорные направления токов часто назначаются произвольно. Когда цепь решена, отрицательное значение тока подразумевает, что фактическое направление тока через этот элемент цепи противоположно выбранному опорному направлению. <sup>[ a ] : 29</sup>

## Закон Ома

Закон Ома гласит, что ток через проводник между двумя точками прямо пропорционален разности потенциалов между двумя точками. Вводя константу пропорциональности, сопротивление , <sup>[ 20 ]</sup> приходим к обычному математическому уравнению, описывающему эту связь: <sup>[ 21 ]</sup>

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

где *I* — ток через проводник в амперах , *V* — разность потенциалов, измеренная *на* проводнике в вольтах , а *R* — сопротивление проводника в омах . Более конкретно, закон Ома гласит, что *R* в этом отношении является постоянной величиной, независимой от тока. <sup>[ 22 ]</sup>

## Переменный и постоянный ток

В системах переменного тока (AC) движение электрического заряда периодически меняет направление. Переменный ток — это форма электроэнергии, которая чаще всего поставляется в предприятия и жилые дома. Обычная форма волны цепи переменного тока — синусоида , хотя в некоторых приложениях используются альтернативные формы волны, такие как треугольные или квадратные волны . Аудио- и радиосигналы , передаваемые по электрическим проводам, также являются примерами переменного тока. Важной целью в этих приложениях является восстановление информации, закодированной (или модулированной ) в сигнале переменного тока.

Напротив, постоянный ток (DC) относится к системе, в которой движение электрического заряда только в одном направлении (иногда называемое однонаправленным потоком). <sup>[ 23 ]</sup> Постоянный ток вырабатывается такими источниками, как батареи , термопары , солнечные элементы и электрические машины коллекторного типа типа динамо . Переменный ток также может быть преобразован в постоянный ток с помощью выпрямителя . Постоянный ток может течь в проводнике , таком как провод, но также может течь через полупроводники , изоляторы или даже через вакуум , как в электронных или ионных пучках . Старое название постоянного тока было *гальваническим током* . <sup>[ 24 ]</sup>

Несмотря на то, что постоянный ток математически и концептуально проще переменного тока, он на самом деле используется менее широко, чем переменный ток. Однако из-за универсальности электрических цепей существует много ситуаций, в которых требуется один тип электрического тока вместо другого.

## Передача мощности

Переменный ток почти всегда используется для передачи электроэнергии потребителям. <sup>[ 25 ]</sup> Причиной этого является совокупность множества исторических и технологических деталей.

Помимо солнечной энергии, большинство методов генерации электроэнергии производят переменный ток. Для того чтобы распределить электроэнергию в виде постоянного тока, необходимо использовать выпрямитель для преобразования исходного переменного тока в постоянный ток. Однако выпрямление является сложным, дорогим и, до недавнего времени, довольно потерянным преобразованием, особенно в масштабах электростанций. Это сделало исторически неэффективным преобразование переменного тока, вырабатываемого электростанциями, в постоянный ток для распределения.

Вдоль линий электропередач, соединяющих электростанции с потребителями, напряжение повышается и понижается, чтобы уменьшить тепловые потери, часто в несколько раз. Хотя постоянный ток изначально испытывает меньшие тепловые потери, чем переменный ток, его нельзя повышать или понижать с помощью трансформаторов. Это связано с тем, что трансформаторы работают по принципу индукции: изменяющееся электрическое поле, создаваемое переменным током, генерирует изменяющееся магнитное поле, которое индуцирует электродвижущую силу (ЭДС) более высокого или более низкого напряжения в подключенной линии электропередач. Однако постоянный ток, как правило, не сильно колеблется, что приводит к неизменному электрическому полю, которое не генерирует магнитного поля, что делает индукцию невозможной. Хотя сейчас и существуют технологии для трансформаторов постоянного тока, они более сложные, массивные и дорогие, чем трансформаторы переменного тока, и когда в большинстве стран мира строились инфраструктурные электросети, такой технологии либо не существовало, либо ее было неэффективно использовать.

Однако существуют определенные случаи, особенно в высоковольтной передаче электроэнергии на большие расстояния ( HVDC ), где используется постоянный ток. Основная проблема с использованием постоянного тока в коммерческой передаче электроэнергии заключается в изменении напряжения для потребителей, но это связано с тем, что напряжение меняется несколько раз. В целях безопасности напряжение понижается по мере приближения к потребителям, чтобы предотвратить прохождение невероятно высоковольтных линий через густонаселенные жилые районы. Однако, если требуется передача постоянного напряжения на большие расстояния, постоянный ток превосходит переменный ток. Постоянный ток лучше переносит электроэнергию на большие расстояния <sup>[ 26 ]</sup> и испытывает меньшие тепловые потери, поскольку скин-эффект наблюдается только в системах переменного тока. <sup>[ 27 ]</sup> Кроме того, несовпадающие по фазе системы переменного тока могут быть подключены только через постоянный ток. Например, электросеть США разделена на три асинхронные системы переменного тока. Для передачи электроэнергии между любыми из этих систем необходимо использовать постоянный ток для посредничества в передаче. <sup>[ 26 ]</sup>

## Электронные устройства

Бытовые электронные устройства в подавляющем большинстве используют постоянный ток. Это связано с природой основных компонентов схемы. Многие важные компоненты в электронных устройствах, такие как транзисторы , диоды и логические вентили , работают на односторонней основе; диод, например, позволяет току течь только в одном фиксированном направлении. Попытка использовать переменный ток с такими компонентами чрезвычайно усложнила бы конструкцию схемы, требуя от конструкций функционировать симметрично относительно направления тока. Кроме того, ЦП обновляются миллионы раз в секунду, что намного быстрее, чем всего лишь 100/120 раз в секунду, когда переменный ток меняет полярности. Это вызвало бы огромные несоответствия в напряжении и производительности ЦП, а это означает, что все устройства, использующие ЦП, должны также использовать постоянный ток.

Однако существуют устройства, которые безразличны к типу тока из-за невероятно простой функциональности. Такие устройства, как лампы накаливания или некоторые тостеры, работают, пропуская ток через элементы с высоким сопротивлением, испуская электромагнитное излучение . Как переменный, так и постоянный ток подвержены влиянию сопротивления, поэтому используемый тип тока не имеет значения, хотя для обоих типов может потребоваться использовать разное напряжение, чтобы получить идентичные результаты.

## Образование

На университетских занятиях по ЭМ, будь то алгебра или исчисление, постоянный ток обычно используется в качестве введения в электрический ток. Это связано с тем, что постоянный ток математически и концептуально проще переменного тока. Постоянный постоянный ток, возможно, гораздо более интуитивен, чем тот, который меняется много раз в секунду. Источники постоянного тока также тривиально добавляются в схемы, как в теории, так и на практике. Однако для переменного тока необходимо учитывать фазу при работе с несколькими источниками питания; смещение фазы на 0 или  $\pi$  имеет огромное значение для функциональности схемы. Кроме того, схемы с емкостными и индуктивными элементами очень легко математически представить с помощью постоянного тока. Заряд на конденсаторе и сопротивление на катушке индуктивности асимптотически стабилизируются со временем, что означает, что системы постоянного тока в конечном итоге достигают устойчивого состояния (обычно довольно быстро в математических практических задачах). Такие системы легко анализировать, как только они достигают устойчивого состояния, и даже системы, которые не стабилизировались, не слишком сложны для анализа, поскольку все требуемые формулы являются относительно простыми функциями времени и начального/конечного напряжения. С другой стороны, переменный ток никогда не достигает устойчивого состояния. Колеблющийся ток означает, что в цепи всегда будут меняться емкостные и индуктивные эффекты, что усложняет математический анализ цепи. Хотя требуемые формулы для этих эффектов все еще являются относительно простыми функциями времени и напряжения, напряжение теперь является синусоидальной функцией времени, не говоря уже о задержке фазы и переадресации в емкостных и индуктивных элементах.

## Происшествия

---

Проявления электрического тока можно разделить на три основных типа: *неорганические* , *биологические* и *технологические* .

## Неорганические проявления электричества в природе

Электростатические материалы – пьезоэлектричество – геофизический поток расплавленного железа

Естественные наблюдаемые примеры электрического тока включают статический электрический разряд и электричество в мантии Земли. Электростатичность была одним из самых ранних открытий неорганического электричества, встречающегося в природе. Уже на заре истории было обнаружено, что некоторые виды камней и смол, такие как янтарь, могут стать электростатическими при трении. Натирание янтаря приведет к тому, что он станет отрицательно заряженным. Пьезоэлектричество возникает при приложении механического напряжения к определенным кристаллам, заставляя их становиться электрически поляризованными. Оксид железа (FeO), который составляет 9% мантии Земли, проводит электричество (особенно в расплавленном виде); считается, что это способствует вращению Земли.

### Атмосферное явление

Вспышки молний также являются одним из самых ранних обнаруженных естественных наблюдаемых примеров электрического тока. Электрический заряд может накапливаться вертикально в плотных облаках, что приводит к молнии, которая разряжается вспышками на землю. Вспышки следуют по пути наименьшего электрического сопротивления через воздух.

Во второй половине XIX века и первой половине XX века было обнаружено, что солнечный ветер является источником полярных сияний, которые возникают в атмосфере вблизи Северного и Южного полюсов. Северное сияние и южное сияние генерируются потоками заряженных частиц, исходящих от Солнца, которые возникают, когда солнечная активность высока (временно сильные солнечные вспышки).

### Космические явления

Открытие токов Биркеланда Кристианом Биркеландом послужило толчком к дальнейшему исследованию электрических явлений в магнитосфере и космосе. Благодаря исследованиям таких новаторских ученых и инженеров, как Ханнес Альфвен, Ирвинг Ленгмюр и Дональд Э. Скотт, было обнаружено, что электричество повсеместно распространено во Вселенной. Плазма составляет большую часть материи в космосе; плазма электрически заряжена. В настоящее время считается, что заполненные плазмой космические нити, вероятно, отвечают за передачу электричества через Вселенную. Недавние астрофизические исследования показывают, что такие нити могут передавать электричество как между галактиками, так и между звездными скоплениями. Нейтронные звезды, пульсары, магнетары, квазары и астрофизические джеты играют важную роль в космических электрических явлениях. Предполагается, что звездообразование в скоплениях частично питается этими нитями, поскольку звездообразование в основном происходит вдоль струн, следуя за плазменными нитями. Считается, что межгалактические плазменные нити медленно вращаются из-за своего электрического заряда, который генерирует многослойные концентрические электромагнитные поля. Это вращение нитей может объяснять положение и вращение галактик. Это область текущих научных исследований. Космический телескоп Джеймса Уэбба дает новые знания, которые позволяют проводить дальнейшие астрофизические исследования в этой области.

## Органические проявления электричества – биологическое использование электричества

Нервная система и электромагнитная чувствительность

Биологическим примером тока является поток ионов в нейронах и нервах, отвечающий как за мозговую активность, так и за сенсорное восприятие. Нейроны есть у всех животных, даже у очень маленьких, таких как морские звезды и морские коньки. Развитие мозга более существенно у высших организмов, что обеспечивает мышление и память. Сознание включено у высших организмов, включая человека. Некоторые млекопитающие, такие как киты и дельфины, способны к беспроводной связи благодаря своей мозговой активности или квантовым эффектам . Стая этих морских млекопитающих может общаться, например, чтобы предупреждать друг друга о хищниках. Перелетные птицы могут чувствовать магнитное поле Земли, используя его для координации своего полета. Некоторые перелетные морские животные, такие как лосось и морские черепахи, также используют магнитное поле Земли для навигации во время миграции на большие расстояния.

### Электрорецепция и электрогенез

Электрорецептивные животные обладают способностью воспринимать естественные электрические стимулы. Электрогенные животные, такие как угри, имеют органы, способные производить электрические разряды — как средство защиты или как часть поведения хищника.

### Фотосинтез и электрификация механической энергии

Некоторые виды растений могут генерировать электричество на микроскопическом уровне, либо посредством фотосинтеза, либо посредством электрификации механической энергии. Например, олеандр способен улавливать механическую энергию ветра, шевелящего его листья, и преобразовывать ее в электричество для использования в растении. Естественный фотосинтез в хлорофилле очень эффективен для преобразования солнечного света в электричество, которое затем управляет химическим образованием глюкозы. Это электричество также может быть использовано искусственно в фотобиоэлектрохимической ячейке.

## **Технологическое использование электрического тока – проводное и беспроводное**

Искусственные явления электрического тока включают контролируемый поток электронов проводимости в металлических проводах, таких как воздушные линии электропередач для передачи энергии на большие расстояния, а также более мелкие провода в электрических и электронных устройствах. Вихревые токи — это электрические токи, которые возникают в проводниках, подвергающихся воздействию изменяющихся магнитных полей. Аналогично, электрические токи возникают, особенно на поверхности проводников, подвергающихся воздействию электромагнитных волн . Когда колебательные электрические токи протекают при правильных напряжениях внутри радиоантенн , генерируются радиоволны .

Пантографы являются примером передачи электроэнергии через скользящий контакт. Пантограф позволил осуществить масштабную электрификацию железных дорог, метрополитена и трамвайных сетей, а также сетей троллейбусов .

Подводные соединительные линии обеспечивают крупномасштабную передачу электроэнергии между странами от побережья к побережью.

В электронике к другим формам электрического тока относятся поток электронов через резисторы или через вакуум в вакуумной трубке , поток ионов внутри батареи и поток дырок внутри металлов и полупроводников .

Недавно разработанное применение электрического тока — беспроводная зарядка аккумуляторов, например, для телефонов и электромобилей. Теорема Пойнтинга показывает, что электрическая энергия может передаваться из точки А в точку В без переноса тока из точки А в точку В. Это достигается путем использования одной или нескольких катушек в точке А. Катушки генерируют электромагнитное поле, которое переносит электрическую энергию в точку В. Устройства беспроводной зарядки потенциально могут быть встроены в мебель, стены или дорожные покрытия. В настоящее время проводятся исследования в области беспроводной зарядки на большом расстоянии

## Измерение

Ток можно измерить с помощью амперметра . <sup>[ 28 ] [ 29 ] [ 30 ]</sup> Хотя гальванометр обеспечивает прямое измерение электрического тока, он требует разрыва электрической цепи, что может быть неудобно для некоторых применений. Ток также можно измерить без разрыва цепи, обнаруживая магнитное поле, связанное с током. <sup>[ 31 ]</sup> Устройства на уровне цепи используют различные методы для измерения тока:

- Шунтирующие резисторы <sup>[ 32 ]</sup>
- Датчики тока на эффекте Холла
- Трансформаторы (однако постоянный ток измерить невозможно)
- Магниторезистивные датчики поля <sup>[ 33 ]</sup>
- Катушки Роговского
- Токовые зажимы

## Резистивный нагрев

Джоулевое нагревание, также известное как *омическое нагревание* и *резистивное нагревание* , представляет собой процесс рассеивания мощности <sup>[ 34 ]</sup> :<sup>36</sup> , при котором прохождение электрического тока через проводник увеличивает внутреннюю энергию проводника, <sup>[ 35 ]</sup> :846 преобразуя термодинамическую работу в тепло . <sup>[ 35 ]</sup> :846, прим. <sup>5</sup> Это явление впервые изучил Джеймс Прескотт Джоуль в 1841 году. Джоуль погрузил отрезок провода в фиксированную массу воды и измерил повышение температуры из-за известного тока через провод в течение 30 минут . Изменяя ток и длину провода, он вывел, что выделяемое тепло пропорционально квадрату тока , умноженному на электрическое сопротивление провода.

$$P \propto I^2 R.$$

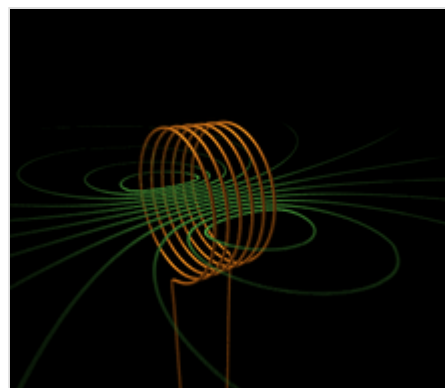
Это соотношение известно как закон Джоуля . <sup>[ 34 ]</sup> :<sup>36</sup> Единица измерения энергии в системе СИ впоследствии была названа джоулем и получила символ *Дж* . <sup>[ 7 ]</sup> :<sup>20</sup> Общеизвестная единица измерения мощности в системе СИ, ватт (символ: Вт), эквивалентна одному джоулю в секунду. <sup>[ 7 ]</sup> :<sup>20</sup>

## Электромагнетизм

### Электромагнит



В электромагните катушка проводов ведет себя как магнит , когда через нее протекает электрический ток. <sup>[ 36 ] [ 37 ]</sup> Когда ток отключается, катушка немедленно теряет свой магнетизм. Электрический ток создает магнитное поле . <sup>[ 38 ]</sup> Магнитное поле можно визуализировать как узор из круговых линий поля, окружающих провод, который сохраняется до тех пор, пока есть ток.



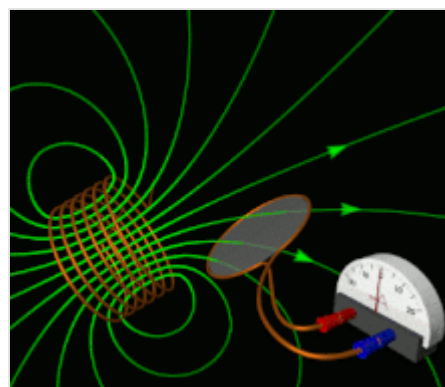
Магнитное поле создается электрическим током в соленоиде .

## Электромагнитная индукция

Магнитные поля также могут использоваться для создания электрических токов. Когда к проводнику прикладывается изменяющееся магнитное поле, индуцируется электродвижущая сила (ЭДС), <sup>[ 35 ]</sup> : 1004 которая запускает электрический ток, когда есть подходящий путь.

## Радиоволны

Когда электрический ток течет в проводнике соответствующей формы на радиочастотах , могут генерироваться радиоволны . Они движутся со скоростью света и могут вызывать электрические токи в удаленных проводниках.



Через соленоид протекает переменный электрический ток, создавая изменяющееся магнитное поле. Это поле вызывает протекание электрического тока в проволочной петле посредством электромагнитной индукции .

## Механизмы проводимости в различных средах

В металлических твердых телах электрический заряд течет посредством электронов , от более низкого к более высокому электрическому потенциалу . В других средах любой поток заряженных объектов (например, ионов) может составлять электрический ток. Чтобы дать определение тока независимо от типа носителей заряда, условный ток определяется как движущийся в том же направлении, что и поток положительного заряда. Таким образом, в металлах, где носители заряда (электроны) отрицательны, условный ток имеет противоположное направление общему движению электронов. В проводниках, где носители заряда положительны, условный ток имеет то же направление, что и носители заряда.

В вакууме может быть сформирован пучок ионов или электронов. В других проводящих материалах электрический ток обусловлен потоком как положительно, так и отрицательно заряженных частиц одновременно. В третьих ток полностью обусловлен потоком положительного заряда . Например, электрические токи в электролитах представляют собой потоки положительно и отрицательно заряженных ионов. В обычном свинцово-кислотном электрохимическом элементе электрические

токи состоят из положительных ионов гидроксония , текущих в одном направлении, и отрицательных ионов сульфата, текущих в другом. Электрические токи в искрах или плазме представляют собой потоки электронов, а также положительных и отрицательных ионов. Во льду и в некоторых твердых электролитах электрический ток полностью состоит из текущих ионов.

## Металлы

В металле некоторые внешние электроны в каждом атоме не связаны с отдельными молекулами, как в молекулярных твердых телах , или в полных зонах, как в изоляционных материалах, а могут свободно перемещаться внутри металлической решетки . Эти электроны проводимости могут служить носителями заряда , перенося ток. Металлы особенно проводящие, потому что таких свободных электронов много. При отсутствии внешнего электрического поля эти электроны хаотично перемещаются из-за тепловой энергии , но в среднем внутри металла нет чистого тока. При <sup>6</sup> комнатной температуре средняя скорость этих случайных движений составляет 10<sup>6</sup> метров в секунду. [ 39 ] Учитывая поверхность, через которую проходит металлический провод, электроны движутся в обоих направлениях по поверхности с одинаковой скоростью. Как писал Георгий Гамов в своей научно-популярной книге « Один, два, три... Бесконечность » (1947), «Металлические вещества отличаются от всех других материалов тем, что внешние оболочки их атомов связаны довольно слабо и часто позволяют одному из своих электронов выходить на свободу. Таким образом, внутренняя часть металла заполнена большим количеством неприсоединенных электронов, которые бесцельно путешествуют, как толпа перемещенных лиц. Когда металлический провод подвергается воздействию электрической силы, приложенной к его противоположным концам, эти свободные электроны устремляются в направлении силы, образуя то, что мы называем электрическим током».

Когда металлический провод подключается к двум клеммам источника постоянного напряжения , например, батареи , источник создает электрическое поле поперек проводника. В момент контакта свободные электроны проводника вынуждены дрейфовать к положительной клемме под влиянием этого поля. Таким образом, свободные электроны являются носителями заряда в типичном твердом проводнике.

Для постоянного потока заряда через поверхность ток  $I$  (в амперах) можно рассчитать с помощью следующего уравнения:

$$I = \frac{Q}{t},$$

где  $Q$  — электрический заряд, переносимый через поверхность за время  $t$  . Если  $Q$  и  $t$  измеряются в кулонах и секундах соответственно,  $I$  измеряется в амперах.

В более общем смысле электрический ток можно представить как скорость, с которой заряд протекает через заданную поверхность:

$$I = \frac{dQ}{dt}.$$

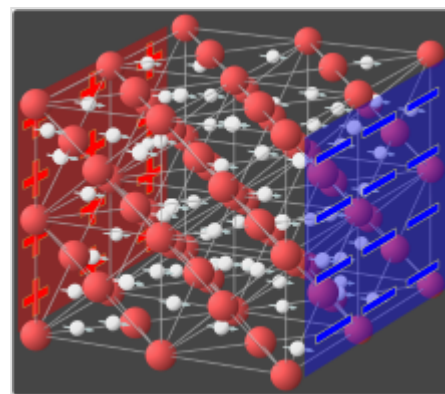
## Электролиты

Электрические токи в электролитах представляют собой потоки электрически заряженных частиц ( ионов ). Например, если электрическое поле поместить через раствор Na<sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup> (и условия правильные), ионы натрия движутся к отрицательному электроду (катоде), а ионы хлора движутся к

положительному электроду (аноду). Реакции происходят на обеих поверхностях электродов, нейтрализуя каждый ион.

Водный лед и некоторые твердые электролиты, называемые протонными проводниками , содержат положительные ионы водорода (« протоны »), которые подвижны. В этих материалах электрические токи состоят из движущихся протонов, в отличие от движущихся электронов в металлах.

В некоторых электролитных смесях ярко окрашенные ионы являются движущимися электрическими зарядами. Медленное изменение цвета делает ток видимым. [ 40 ]



Протонный проводник в статическом электрическом поле .

## Газы и плазма

В воздухе и других обычных газах ниже поля пробоя доминирующим источником электропроводности являются относительно немногие подвижные ионы, производимые радиоактивными газами, ультрафиолетовым светом или космическими лучами. Поскольку электропроводность низкая, газы являются диэлектриками или изоляторами . Однако, как только приложенное электрическое поле приближается к значению пробоя , свободные электроны становятся достаточно ускоренными электрическим полем, чтобы создавать дополнительные свободные электроны путем столкновения и ионизации нейтральных атомов или молекул газа в процессе, называемом лавинным пробоем . Процесс пробоя образует плазму , которая содержит достаточно подвижных электронов и положительных ионов, чтобы сделать ее электрическим проводником. В этом процессе она образует светоизлучающий проводящий путь, такой как искра , дуга или молния .

Плазма — это состояние вещества, в котором некоторые электроны в газе отрываются или «ионизируются» от своих молекул или атомов. Плазма может быть образована высокой температурой или применением сильного электрического или переменного магнитного поля, как отмечено выше. Из-за своей меньшей массы электроны в плазме ускоряются быстрее в ответ на электрическое поле, чем более тяжелые положительные ионы, и, следовательно, переносят большую часть тока. Свободные ионы рекомбинируют, создавая новые химические соединения (например, расщепляя атмосферный кислород на один кислород  $[O_2 \rightarrow 2O]$ , который затем рекомбинирует, создавая озон  $[O_3]$ ). [ 41 ]

## Вакуум

Поскольку « идеальный вакуум » не содержит заряженных частиц, он обычно ведет себя как идеальный изолятор. Однако поверхности металлических электродов могут привести к тому, что область вакуума станет проводящей, инжектируя свободные электроны или ионы либо посредством полевой электронной эмиссии , либо посредством термоэлектронной эмиссии . Термоэлектронная эмиссия происходит, когда тепловая энергия превышает работу выхода металла , в то время как полевая электронная эмиссия происходит, когда электрическое поле на поверхности металла достаточно велико, чтобы вызвать туннелирование , что приводит к выбросу свободных электронов из металла в вакуум. Электроды с внешним нагревом часто используются для создания электронного облака, как в нити накала или косвенно нагретом катоде электронных ламп . Холодные электроды также могут спонтанно создавать электронные облака посредством термоэлектронной эмиссии, когда образуются небольшие раскаленные области (называемые *катодными пятнами* или *анодными*

*пятнами* ). Это раскаленные области поверхности электрода, которые создаются локализованным сильным током. Эти области могут быть инициированы полевой электронной эмиссией , но затем поддерживаются локализованной термоионной эмиссией после формирования вакуумной дуги . Эти небольшие области электронной эмиссии могут образовываться довольно быстро, даже взрывообразно, на металлической поверхности, подвергаемой воздействию сильного электрического поля. Вакуумные трубки и спритроны являются некоторыми из электронных коммутационных и усилительных устройств, основанных на вакуумной проводимости.

## Сверхпроводимость

Сверхпроводимость — это явление точно нулевого электрического сопротивления и выталкивания магнитных полей , происходящее в некоторых материалах при охлаждении ниже характерной критической температуры . Оно было открыто Хайке Камерлинг-Оннесом 8 апреля 1911 года в Лейдене . Подобно ферромагнетизму и атомным спектральным линиям , сверхпроводимость — это квантово-механическое явление. Оно характеризуется эффектом Мейснера , полным выталкиванием линий магнитного поля из внутренней части сверхпроводника при его переходе в сверхпроводящее состояние. Возникновение эффекта Мейснера указывает на то, что сверхпроводимость нельзя понимать просто как идеализацию идеальной проводимости в классической физике .

## Полупроводник

В полупроводнике иногда полезно думать о токе как о результате потока положительных « дырок » (подвижных носителей положительного заряда, которые являются местами, где кристалл полупроводника не имеет валентного электрона). Это имеет место в полупроводнике р-типа. Полупроводник имеет промежуточную по величине электропроводность между проводимостью проводника и изолятора . Это означает проводимость примерно в диапазоне от  $10^{-2}$  до  $10^4$  <sup>до сименс</sup> на сантиметр (См·см<sup>-1</sup> ).

В классических кристаллических полупроводниках электроны могут иметь энергию только в определенных зонах (т. е. диапазонах уровней энергии). Энергетически эти зоны расположены между энергией основного состояния, состояния, в котором электроны прочно связаны с атомными ядрами материала, и энергией свободных электронов, последняя описывает энергию, необходимую для того, чтобы электрон полностью покинул материал. Каждая из энергетических зон соответствует многим дискретным квантовым состояниям электронов, и большинство состояний с низкой энергией (ближе к ядру) заняты, вплоть до определенной зоны, называемой валентной зоной . Полупроводники и изоляторы отличаются от металлов , поскольку валентная зона в любом данном металле почти заполнена электронами при обычных рабочих условиях, в то время как очень мало (полупроводник) или практически ни одного (изолятор) из них доступно в зоне проводимости , зоне, расположенной непосредственно над валентной зоной.

Легкость возбуждения электронов в полупроводнике из валентной зоны в зону проводимости зависит от ширины запрещенной зоны между зонами. Размер этой запрещенной зоны служит условной разделительной линией (примерно 4 эВ ) между полупроводниками и изоляторами .

При ковалентных связях электрон перемещается путем перескока на соседнюю связь. Принцип исключения Паули требует, чтобы электрон был поднят в более высокое антисвязывающее состояние этой связи. Для делокализованных состояний, например, в одном измерении, то есть в нанопроводе , для каждой энергии существует состояние с электронами, текущими в одном направлении, и другое состояние с электронами, текущими в другом. Для протекания чистого тока должно быть занято

больше состояний для одного направления, чем для другого. Для этого требуется энергия, так как в полупроводнике следующие более высокие состояния лежат выше запрещенной зоны. Часто это формулируется так: заполненные зоны не способствуют электропроводности . Однако, когда температура полупроводника поднимается выше абсолютного нуля , в полупроводнике появляется больше энергии, которую можно потратить на вибрацию решетки и на возбуждение электронов в зону проводимости. Электроны, несущие ток в зоне проводимости, известны как *свободные электроны* , хотя их часто просто называют *электронами* , если это понятно из контекста.

## Плотность тока и закон Ома

Плотность тока — это скорость, с которой заряд проходит через выбранную единицу площади. <sup>[ 42 ] : 31</sup> Она определяется как вектор , величина которого представляет собой ток на единицу площади поперечного сечения. <sup>[ 5 ] : 749</sup> Как обсуждалось в разделе Исходное направление , направление является произвольным. Условно, если движущиеся заряды положительны, то плотность тока имеет тот же знак, что и скорость зарядов. Для отрицательных зарядов знак плотности тока противоположен скорости зарядов. <sup>[ 5 ] : 749</sup> В единицах СИ плотность тока (символ: *j*) выражается в основных единицах СИ амперах на квадратный метр. <sup>[ 7 ] : 22</sup>

В линейных материалах, таких как металлы, и при низких частотах плотность тока по всей поверхности проводника равномерна. В таких условиях закон Ома гласит, что ток прямо пропорционален разности потенциалов между двумя концами (поперек) этого металлического (идеального) резистора (или другого омического устройства ):

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

где *I* — ток, измеряемый в амперах; *V* — это разность потенциалов , измеряемая в вольтах ; и *R* — это сопротивление , измеряемое в омах . Для переменных токов , особенно на более высоких частотах, скин-эффект приводит к тому, что ток распространяется неравномерно по сечению проводника, с более высокой плотностью вблизи поверхности, тем самым увеличивая кажущееся сопротивление.

## Скорость дрейфа

Подвижные заряженные частицы внутри проводника постоянно движутся в случайных направлениях, как частицы газа . (Точнее, газа Ферми .) Чтобы создать чистый поток заряда, частицы также должны двигаться вместе со средней скоростью дрейфа. Электроны являются носителями заряда в большинстве металлов, и они следуют по хаотичной траектории, отскакивая от атома к атому, но, как правило, дрейфуя в противоположном направлении электрического поля. Скорость, с которой они дрейфуют, можно рассчитать из уравнения:

$$v = \frac{I}{nAQ}$$

где

- *v* — это скорость дрейфа
- *I* — это электрический ток
- *n* — число заряженных частиц в единице объема (или плотность носителей заряда)
- *A* — площадь поперечного сечения проводника

- $Q$ — это заряд каждой частицы.

Обычно электрические заряды в твердых телах текут медленно. Например, в медной проволоке с поперечным сечением  $0,5\text{ мм}^2$  по которой течет ток силой  $5\text{ А}$ , скорость дрейфа электронов составляет порядка миллиметра в секунду. Возьмем другой пример: в почти вакууме внутри электронно-лучевой трубки электроны движутся по почти прямым линиям со скоростью около одной десятой скорости света .

Любой ускоряющийся электрический заряд, а следовательно, и любой изменяющийся электрический ток, порождает электромагнитную волну, которая распространяется с очень высокой скоростью за пределами поверхности проводника. Эта скорость обычно составляет значительную часть скорости света, как можно вывести из уравнений Максвелла , и, следовательно, во много раз превышает скорость дрейфа электронов. Например, в линиях электропередач переменного тока волны электромагнитной энергии распространяются через пространство между проводами, перемещаясь от источника к удаленной нагрузке , хотя электроны в проводах движутся только вперед и назад на крошечном расстоянии.

Отношение скорости электромагнитной волны к скорости света в свободном пространстве называется коэффициентом скорости и зависит от электромагнитных свойств проводника и окружающих его изоляционных материалов, а также от их формы и размера.

Величины (но не природу) этих трех скоростей можно проиллюстрировать аналогией с тремя подобными скоростями, связанными с газами. (См. также гидравлическую аналогию .)

- Низкая скорость дрейфа носителей заряда аналогична движению воздуха, иными словами, ветра.
- Высокая скорость электромагнитных волн примерно аналогична скорости звука в газе (звуковые волны распространяются в воздухе гораздо быстрее, чем крупномасштабные движения, такие как конвекция ).
- Хаотическое движение зарядов аналогично теплу — тепловой скорости хаотически колеблющихся частиц газа.

## Смотрите также

---



**Портал  
электроники**

- Плотность тока
- Ток смещения (электрический) и Магнитный ток § Магнитный ток смещения
- Поражение электрическим током
- Электрические измерения
- История электротехники
- Символы полярности
- Международная система величин
- Единицы измерения электромагнетизма в системе СИ
- Однофазная электрическая мощность
- Статическое электричество
- Трёхфазное электропитание
- Двухфазная электрическая мощность

## Примечания

---

- а. Наш первый шаг в анализе — предположение об опорных направлениях неизвестных токов. <sup>[19]</sup>

## Ссылки

---

1. МакМонагл, Дерек; Эннинг, Полин (2016-03-31). *Интегрированная наука для CSEC®* (<http://books.google.com/books?id=BM7KDwAAQBAJ&dq=An+%22electric+current+is+a+flow+of+charged+particles%22&pg=PA206>) . OUP Oxford. стр. 206. ISBN 978-0-19-839562-1.
2. Фейсер, Джордж (2015-05-15). *Edexcel A Level Chemistry Student Book 1 Джорджа Фейсера* (<https://books.google.com/books?id=q4KwCAAAQBAJ&dq=An+%22electric+current+is+a+flow+of+charged+particles%22&pg=PT86>) . Hodder Education. ISBN (<https://books.google.com/books?id=q4KwCAAAQBAJ&dq=An+%22electric+current+is+a+flow+of+charged+particles%22&pg=PT86>) 978-1-4718-3282-6.
3. Моррис, Эндрю (2022-10-19). *Насекомые, наркотики и трехконтактные вилки: повседневная наука, просто объясненная* (<https://books.google.com/books?id=Q12CEAAQBAJ&dq=An+%22electric+current+is+a+flow+of+charged+particles%22&pg=PT237>) . CRC Press. ISBN (<https://books.google.com/books?id=Q12CEAAQBAJ&dq=An+%22electric+current+is+a+flow+of+charged+particles%22&pg=PT237>) 978-1-000-72984-9.
4. Хоровиц, Пол ; Хилл, Уинфилд (2015). *Искусство электроники* (3-е изд.). Cambridge University Press . ISBN 978-0-521-80926-9.
5. Уокер, Джерл; Холлидей, Дэвид; Резник, Роберт (2014). *Основы физики* (10-е изд.). Хобокен, Нью-Джерси: Wiley. ISBN 978-1118230732. OCLC 950235056 (<https://search.worldcat.org/oclc/950235056>) .
6. Энтони С. Фишер-Криппс (2004). *Спутник электроники* (<https://books.google.com/books?id=3SsYctmvZkoC&pg=PA13>) . CRC Press. стр. 13. ISBN (<https://books.google.com/books?id=3SsYctmvZkoC&pg=PA13>) 978-0-7503-1012-3.
7. *Международная система единиц* (<https://www.bipm.org/documents/20126/41483022/SI-Brochure-9-EN.pdf>) (PDF) (9-е изд.), Международное бюро мер и весов, декабрь 2022 г., ISBN (<https://www.bipm.org/documents/20126/41483022/SI-Brochure-9-EN.pdf>) 978-92-822-2272-0
8. Блэквелл, Гленн Р. (2017-12-19). *Справочник по электронным упаковкам* ([https://books.google.com/books?id=\\_AIEDwAAQBAJ&dq=Electric+currents+create+magnetic+fields,+which+are+used+in+motors,+generators,+inductors,+and+transformers&pg=PT235](https://books.google.com/books?id=_AIEDwAAQBAJ&dq=Electric+currents+create+magnetic+fields,+which+are+used+in+motors,+generators,+inductors,+and+transformers&pg=PT235)) . CRC Press. ISBN ([https://books.google.com/books?id=\\_AIEDwAAQBAJ&dq=Electric+currents+create+magnetic+fields,+which+are+used+in+motors,+generators,+inductors,+and+transformers&pg=PT235](https://books.google.com/books?id=_AIEDwAAQBAJ&dq=Electric+currents+create+magnetic+fields,+which+are+used+in+motors,+generators,+inductors,+and+transformers&pg=PT235)) 978-1-351-83554-1.

9. Сингх, Кулвант (2023-08-30). *Законы науки и их применение* (<https://books.google.com/books?id=nXXaEAAAQBAJ&dq=Electric+currents+create+magnetic+fields,+which+are+used+in+motors,+generators,+inductors,+and+transformers&pg=PA214>) . Cambridge Scholars Publishing. стр. 214. ISBN (<https://books.google.com/books?id=nXXaEAAAQBAJ&dq=Electric+currents+create+magnetic+fields,+which+are+used+in+motors,+generators,+inductors,+and+transformers&pg=PA214>) 978-1-5275-2911-3.
10. DK (2020-10-01). *Визуальная энциклопедия* (<https://books.google.com/books?id=zXL0DwAAQBAJ&dq=electromagnetic+waves,+which+are+used+in+telecommunications+to+broadcast+information&pg=PA272>) . Dorling Kindersley Limited. стр. 272. ISBN (<https://books.google.com/books?id=zXL0DwAAQBAJ&dq=electromagnetic+waves,+which+are+used+in+telecommunications+to+broadcast+information&pg=PA272>) 978-0-241-50166-5.
11. Лоу, ТЛ; Раунс, Джон (2002). *Расчеты для физики уровня А*. Нельсон Торнес. стр. 2. ISBN 0748767487.
12. Берлин, Ховард М.; Гетц, Фрэнк К. (1988). *Принципы электронных приборов и измерений* . Merrill Pub. Co. стр. 37. ISBN 0675204496.
13. Кумар, К. С. Суреш (2013). "Раздел 1.2.3". *Анализ электрических цепей* . Pearson Education India. ISBN 978-9332514102." «Сила тока» обычно именуется самим «током»."
14. Ампер, АМ (1822). «Recueil d'Observations Électro-dynamiques» (<http://www.ampere.cnrs.fr/textes/recueil/pdf/recueilobservationsd.pdf>)(PDF) (на французском языке). Париж: Chez Crochard Libraire. п. 56. Архивировано (<https://web.archive.org/web/20110724083412/http://www.ampere.cnrs.fr/textes/recueil/pdf/recueilobservationsd.pdf>)(PDF) из оригинала 24 июля 2011 г. (<http://www.ampere.cnrs.fr/textes/recueil/pdf/recueilobservationsd.pdf>) (<https://web.archive.org/web/20110724083412/http://www.ampere.cnrs.fr/textes/recueil/pdf/recueilobservationsd.pdf>)
15. *Электроэнергия* (<https://books.google.com/books?id=BCZLAAAAYAAJ>) . Т. 6. 1894. С. 411, 1894. (<https://books.google.com/books?id=BCZLAAAAYAAJ>)
16. Ависон, Джон (2014). *Мир физики* (<https://books.google.com/books?id=DojwZzKAvN8C&dq=%22conventional+current%22+positive+charge&pg=PA221>) . Томас Нельсон и сыновья. стр. 221. ISBN (<https://books.google.com/books?id=DojwZzKAvN8C&dq=%22conventional+current%22+positive+charge&pg=PA221>) 9780174387336.
17. МакКомб, Гордон; Бойсен, Эрл (2005). *Электроника для чайников* (<https://books.google.com/books?id=CvLkgK8PBjKc&dq=%22conventional+current%22&pg=PA12>) . Wiley. стр. 12. ISBN (<https://books.google.com/books?id=CvLkgK8PBjKc&dq=%22conventional+current%22&pg=PA12>) 9780764597190.
18. Кумар, К. С. Суреш (2008). *Электрические цепи и сети* (<https://books.google.com/books?id=ZzeXM-IQnIUC&pg=PA278>) . Pearson Education India. стр. 26–28. ISBN (<https://books.google.com/books?id=ZzeXM-IQnIUC&pg=PA278>) 978-8131713907.
19. Хейт, Уильям (1989). *Инженерная электромагнетика* (5-е изд.). McGraw-Hill. ISBN 0070274061.
20. Консоливер, Эрл Л.; Митчелл, Гровер И. (1920). Автомобильные *системы зажигания* (<https://archive.org/details/automotiveignit03divigoog/page/n17>) . McGraw-Hill. стр. 4. (<https://archive.org/details/automotiveignit03divigoog/page/n17>) "закон Ома ток пропорциональное напряжению сопротивление." (<https://archive.org/details/automotiveignit03divigoog>) (<https://archive.org/details/automotiveignit03divigoog/page/n17>)""
21. Роберт А. Милликен и Э. С. Бишоп (1917). *Элементы электричества* (<https://archive.org/details/elementselectri00bishgoog>) . Американское техническое общество. стр. 54. (<https://archive.org/details/elementselectri00bishgoog/page/n67>) Закон "Ома ток прямо пропорционален." (<https://archive.org/details/elementselectri00bishgoog>) (<https://archive.org/details/elementselectri00bishgoog/page/n67>)""
22. Оливер Хевисайд (1894). *Электрические статьи* (<https://books.google.com/books?id=IKV-AAAAMAAJ&q=ohm's%20law%20constant%20ratio&pg=PA284>) . Том 1. Macmillan and Co. стр. 283. ISBN (<https://books.google.com/books?id=IKV-AAAAMAAJ&q=ohm's%20law%20constant%20ratio&pg=PA284>) 978-0-8218-2840-3.



23. Хакер, Виктор; Шумерердер, Кристоф (2020-03-23). *Электротехника: Основы* ([https://books.google.com/books?id=cBTzDwAAQBAJ&dq=direct+current+\(DC\)+refers+to+a+system+in+which+the+movement+of+electric+charge+in+only+one+direction+\(sometimes+called+unidirectional+flow\)&pg=PA13](https://books.google.com/books?id=cBTzDwAAQBAJ&dq=direct+current+(DC)+refers+to+a+system+in+which+the+movement+of+electric+charge+in+only+one+direction+(sometimes+called+unidirectional+flow)&pg=PA13)) . Walter de Gruyter GmbH & Co KG. стр. 13. ISBN ([https://books.google.com/books?id=cBTzDwAAQBAJ&dq=direct+current+\(DC\)+refers+to+a+system+in+which+the+movement+of+electric+charge+in+only+one+direction+\(sometimes+called+unidirectional+flow\)&pg=PA13](https://books.google.com/books?id=cBTzDwAAQBAJ&dq=direct+current+(DC)+refers+to+a+system+in+which+the+movement+of+electric+charge+in+only+one+direction+(sometimes+called+unidirectional+flow)&pg=PA13)) 978-3-11-052111-5.
24. Эндрю Дж. Робинсон; Линн Снайдер-Маклер (2007). *Клиническая электрофизиология: электротерапия и электрофизиологическое тестирование* (<https://books.google.com/books?id=C2-9bcIjPBsC&q=%22galvanic+current%22+%22direct+current%22&pg=PA10>) (3-е изд.). Липпинкотт Уильямс и Уилкинс. стр. 10. ISBN (<https://books.google.com/books?id=C2-9bcIjPBsC&q=%22galvanic+current%22+%22direct+current%22&pg=PA10>) 978-0-7817-4484-3.
25. "Война токов: переменный ток против постоянного тока" (<https://www.energy.gov/articles/war-currents-ac-vs-dc-power>) . *Energy.gov* . Получено 2024-07-17 . (<https://www.energy.gov/articles/war-currents-ac-vs-dc-power>)
26. "Connecting the Country with HVDC" (<https://www.energy.gov/oe/articles/connecting-country-hvdc>). *Energy.gov*. Получено 2024-07-20 . (<https://www.energy.gov/oe/articles/connecting-country-hvdc>)
27. Колобов, VI; Эконому, DJ (16 декабря 1996 г.). "Аномальный скин-эффект в плазме газового разряда" ([https://www.chee.uh.edu/sites/chbe/files/faculty/economou/psst\\_97\\_skin\\_effect.pdf](https://www.chee.uh.edu/sites/chbe/files/faculty/economou/psst_97_skin_effect.pdf))(PDF) . *Plasma Sources Science and Technology* : 1. ([https://www.chee.uh.edu/sites/chbe/files/faculty/economou/psst\\_97\\_skin\\_effect.pdf](https://www.chee.uh.edu/sites/chbe/files/faculty/economou/psst_97_skin_effect.pdf))
28. Джонсон, Кит (2001). *Физика для вас* (<https://books.google.com/books?id=D4nrQDzq1jkC&dq=%22Current+can+be+measured+using+an+ammeter%22&pg=PA256>) . Нельсон Торнс. стр. 256. ISBN (<https://books.google.com/books?id=D4nrQDzq1jkC&dq=%22Current+can+be+measured+using+an+ammeter%22&pg=PA256>) 978-0-7487-6236-1.
29. Лознен, Стели; Болинтиняну, Константин; Сварт, Ян (2017-05-31). *Соответствие электротехнической продукции и техника безопасности* (<https://books.google.com/books?id=24Q0DwAAQBAJ&dq=%22Current+can+be+measured+using+an+ammeter%22&pg=PA343>) . Artech House. стр. 343. ISBN (<https://books.google.com/books?id=24Q0DwAAQBAJ&dq=%22Current+can+be+measured+using+an+ammeter%22&pg=PA343>) 978-1-63081-456-4.
30. Робертс, Саймон (1991). *Солнечное электричество: практическое руководство по проектированию и установке малых фотоэлектрических систем* (<https://books.google.com/books?id=ReNSAAAAMAAJ&q=%22Current+can+be+measured+using+an+ammeter%22>) . Prentice Hall. стр. 351. ISBN (<https://books.google.com/books?id=ReNSAAAAMAAJ&q=%22Current+can+be+measured+using+an+ammeter%22>) 978-0-13-826314-0.
31. Ярошевский, Мачей; Томас, Сабу; Ране, Аджай В. (2018-11-29). *Современные материалы для электромагнитного экранирования: основы, свойства и применение* (<https://books.google.com/books?id=Rlt0DwAAQBAJ&dq=Current+can+also+be+measured+without+breaking+the+circuit+by+detecting+the+magnetic+field+associated+with+the+current&pg=PA42>) . John Wiley & Sons. стр. 42. ISBN (<https://books.google.com/books?id=Rlt0DwAAQBAJ&dq=Current+can+also+be+measured+without+breaking+the+circuit+by+detecting+the+magnetic+field+associated+with+the+current&pg=PA42>) 978-1-119-12861-8.
32. "Что такое датчик тока и как он используется?" (<http://www.ti.com/analog/docs/microsite.tsp?sectionId=560&tabId=2180&micrositeId=7>) . Получено 22.12.2011 . (<http://www.ti.com/analog/docs/microsite.tsp?sectionId=560&tabId=2180&micrositeId=7>)
33. Фридрих, Андреас П.; Лемме, Хельмут (2000-05-01). "Универсальный датчик тока" (<http://web.archive.org/web/20160304051430/http://www.sensorsmag.com/sensors/electric-magnetic/the-universal-current-sensor-1029>) . *Fierce Electronics* . Архивировано из оригинала (<http://www.sensorsmag.com/sensors/electric-magnetic/the-universal-current-sensor-1029>) 2016-03-04 . Получено 2011-12-22 . (<https://web.archive.org/web/20160304051430/http://www.sensorsmag.com/sensors/electric-magnetic/the-universal-current-sensor-1029>) (<http://www.sensorsmag.com/sensors/electric-magnetic/the-universal-current-sensor-1029>)

34. Джаффе, Роберт Л.; Тейлор, Вашингтон (2018). *Физика энергии*. Cambridge University Press.
35. Serway, Raymond A.; Jewett, John W. (2004). *Физика для ученых и инженеров* (<https://archive.org/details/physicssciengv2p00serw>) (6-е изд.). Thomson Brooks/Cole. ISBN (<https://archive.org/details/physicssciengv2p00serw>) 0-534-40842-7.
36. Совет, Oswaal Editorial (2024-02-15). *Решение учебника NCERT по естествознанию, класс 7 | Для экзамена 2024 года* (<https://books.google.com/books?id=E-P5EAAAQBAJ&dq=In+an+electromagnet+a+coil+of+wires+behaves+like+a+magnet+when+an+electric+current+flows+through+it&pg=PA50>) . Oswaal Books. стр. 50. ISBN (<https://books.google.com/books?id=E-P5EAAAQBAJ&dq=In+an+electromagnet+a+coil+of+wires+behaves+like+a+magnet+when+an+electric+current+flows+through+it&pg=PA50>) 978-93-5958-334-1.
37. Совет, Oswaal Editorial (2024-03-08). *Oswaal NCERT Textbook Solution Class 7 Science | Mathematics | Set of 2 Books | For Latest Exam* (<https://books.google.com/books?id=3P35EAAAQBAJ&dq=In+an+electromagnet+a+coil+of+wires+behaves+like+a+magnet+when+an+electric+current+flows+through+it&pg=PA50>) . Oswaal Books. стр. 50. ISBN (<https://books.google.com/books?id=3P35EAAAQBAJ&dq=In+an+electromagnet+a+coil+of+wires+behaves+like+a+magnet+when+an+electric+current+flows+through+it&pg=PA50>) 978-93-5728-587-2.
38. Кумар, Киран Ашок. *Новая любознательная научная книга 7*. (<https://books.google.com/books?id=AJYtDAAAQBAJ&dq=When+the+current+is+switched+off,+the+coil+loses+its+magnetism+immediately.+Electric+current+produces+a+magnetic+field&pg=PA170>) S. Chand Publishing. стр. 170. ISBN (<https://books.google.com/books?id=AJYtDAAAQBAJ&dq=When+the+current+is+switched+off,+the+coil+loses+its+magnetism+immediately.+Electric+current+produces+a+magnetic+field&pg=PA170>) 978-93-85676-60-4.
39. "Механизм проводимости в металлах" (<https://web.archive.org/web/20121025004809/http://library.thinkquest.org/C0111709/English/DC-Circuits/mechanism.html>) . *Think Quest* . Архивировано из оригинала (<http://library.thinkquest.org/C0111709/English/DC-Circuits/mechanism.html>) 2012-10-25. (<https://web.archive.org/web/20121025004809/http://library.thinkquest.org/C0111709/English/DC-Circuits/mechanism.html>) (<http://library.thinkquest.org/C0111709/English/DC-Circuits/mechanism.html>)
40. Хольце, Рудольф (2009). *Экспериментальная электрохимия: лабораторный учебник* (<https://books.google.com/books?id=TbcDvDcDFB0C&pg=PA44>) . John Wiley & Sons. стр. 44. ISBN (<https://books.google.com/books?id=TbcDvDcDFB0C&pg=PA44>) 978-3527310982.
41. "Lab Note #106 (<http://www.arcsuppressiontechnologies.com/arc-suppression-facts/lab-app-notes/>) Влияние подавления дуги на окружающую среду (<http://www.arcsuppressiontechnologies.com/arc-suppression-facts/lab-app-notes/>) " (<http://www.arcsuppressiontechnologies.com/arc-suppression-facts/lab-app-notes/>) . Технологии подавления дуги. Апрель 2011 г. Получено 15 марта 2012 г. (<http://www.arcsuppressiontechnologies.com/arc-suppression-facts/lab-app-notes/>)
42. Зангвилл, Эндрю (2013). *Современная электродинамика* . Издательство Кембриджского университета. ISBN 978-0-521-89697-9.

---

Retrieved from "[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electric\\_current&oldid=1238736414](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electric_current&oldid=1238736414)"