

ГЛАВА IV

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

§ 25. Величина тока. Электродвижущая сила и напряжение

Электрический ток представляет собой *движение электрических зарядов* и связанное с перемещением зарядов *движение электрического поля*.

Во многих случаях движение электрического поля, сопутствуя перемещению зарядов, происходит так, что силовые трубки поля скользят по поверхности проводника. В иных случаях происходит полная деформация электрического поля — его усиление или, наоборот, распад; иногда эти изменения электрического поля можно приблизительно охарактеризовать как сокращение (при сближении разноименных зарядов) или, напротив, растяжение (при удалении зарядов) силовых трубок поля.

Под величиной I постоянного тока, или, как часто говорят, под «силой тока», подразумевают количество электричества, проходящего в одну секунду через поперечное сечение проводника. Таким образом, если за время t через поперечное сечение проводника проходит количество электричества Q , то величина тока равна

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

Если ток не постоянен, то под его величиной понимают отношение количества электричества, прошедшего через поперечное сечение проводника за элементарно малый промежуток времени, к этому промежутку времени, т. е.

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

Обращаясь к аналогии между электрическим током и током жидкости, мы видим, что величина тока соответствует в гидродинамических явлениях «секундному расходу жидкости», т. е. является обобщенной скоростью процесса. Поэтому нужно признать, что часто применяемое название этой величины — «сила тока» — искажает физический смысл величины I .

За единицу величины тока в практической системе единиц принимают такой ток, когда через поперечное сечение проводника в одну секунду проходит количество электричества, равное кулону; эту величину тока называют *ампером* в память о французском ученом Андрэ Ампере, который первый в 20-х годах XIX в. развил электродинамику. Очевидно, что

$$1 \text{ ампер} = 1 \frac{\text{кулон}}{\text{сек}} = 3 \cdot 10^9 \text{ эл.-ст. ед. тока.}$$

Руководствуясь сведениями о взаимодействии токонесущих проводников (§ 65, формулы (3) и (4), где I дано в абсолютных электромагнитных единицах, составляющих 10 ампер, стр. 296 и 335—336) нетрудно обнаружить, что ток в 1 ампер, протекающий по двум длинным параллельным проводам весьма малого сечения, вызывает между ними силу взаимодействия $2 \cdot 10^{-7}$ ньютонов, т. е. 0,02 дин.

Простейший по своему происхождению электрический ток возникает при нарушении ранее существовавшего электростатического равновесия (при «распаде» электрического поля). В этих случаях движение электричества вызывается кулоновым отталкиванием одноименных зарядов. Такой ток, однако, не постоянен и быстро прекращается: он ведет к выравниванию электрических потенциалов. Например, если пластины заряженного конденсатора соединить проводником (рис. 66), то возникнет ток разряда конденсатора. В своей начальной стадии этот процесс (подробнее о нем сказано в § 87), несомненно, вызывается кулоновыми силами и ведет к выравниванию потенциалов.

По исторически сложившейся традиции *за направление тока принимают то направление, по которому должно было бы двигаться положительное электричество*, т. е. направление падения потенциала. В действительности в проводниках первого рода электрический ток представляет собой движение электронов, которое происходит в сторону возрастания потенциала. В проводниках второго рода происходит встречное движение зарядов (ионов) противоположного знака. В этом случае при определении величины тока под количеством электричества, которое ежесекундно проходит через поперечное сечение проводника, понимают арифметическую сумму количеств электричества обоих знаков.

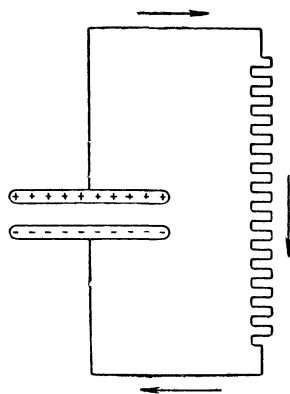


Рис. 66. Разрядный ток конденсатора возникает вследствие кулонова отталкивания одноименных зарядов.

Причину, вызывающую или способную вызвать движение электрических зарядов, называют *электродвижущей силой*. Под электродвижущей силой понимают величину, измеряемую *энергией*, которая *вносится или может быть внесена в цепь тока при перемещении по всей линии тока каждой единицы заряда*. Таким образом, под электродвижущей силой понимают одну и ту же энергетическую характеристику разнообразных процессов, вызывающих или способных вызвать электрический ток.

Существование электродвижущей силы как величины, которая в различных случаях вычисляется одним и тем же способом, связано с особыми свойствами электрического поля движущихся зарядов.

Электрическое поле, образованное движущимися зарядами, существенно отличается от электростатического поля. В электрическом поле, которое образовано движущимися зарядами, могут существовать *замкнутые силовые линии*. В этом случае работа перемещения «пробного» заряда зависит, как пояснено «ниже», от пути перемещения. Действительно, возьмем две какие-либо точки на замкнутой силовой линии и переместим единицу положительного электричества из первой точки во вторую (рис. 67). Нетрудно сообразить, что

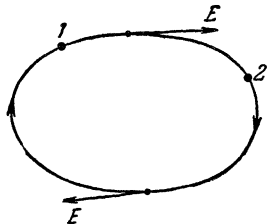


Рис. 67. Замкнутая силовая линия электрического поля, созданного движущимися зарядами.

затраченная работа («разность потенциалов» в этих точках) будет зависеть от того, как мы переместили заряд: «прямо» ли из первой точки во вторую или же предварительно провели заряд, один или несколько раз, вдоль всей замкнутой силовой линии. Очевидно, что, *перемещая единицу положительного электричества по направлению поля вдоль замкнутой силовой линии, мы будем каждый раз при совершении цикла получать некоторое количество работы, которая и является мерой электродвижущей силы \mathcal{E}* .

Таким образом, про какие-либо две точки, лежащие на замкнутой силовой линии, можно сказать, что разность потенциалов для этих точек равна $V_2 - V_1$, но с таким же основанием можно сказать, что упомянутая разность потенциалов равна $V_2 - V_1 + n\mathcal{E}$, где \mathcal{E} есть электродвижущая сила, а n — любое целое число (число циклов, осуществленных попутно с перемещением заряда из точки 1 в точку 2). Имея в виду эту *неоднозначность* потенциала, говорят, что поле, образованное движущимися зарядами, является в отличие от электростатического поля «непотенциальным полем».

По-прежнему понимая под напряженностью поля силу, действующую на положительную единицу заряда (независимо от того, вызвана ли эта сила кулоновым воздействием других зарядов или же она имеет какое-либо иное происхождение), обозначая по-прежнему

напряженность поля через E и учитывая, что *мерой электродвижущей силы является суммарная работа напряженности поля вдоль замкнутой силовой линии*, это единое для разнообразных случаев определение электродвижущей силы мы можем представить в виде формулы

$$\mathcal{E} = \oint E dl. \quad (1)$$

Здесь знак интеграла с пересекающим этот знак кружком означает, что интегрирование (суммирование элементарных работ) проводится вдоль замкнутой линии. Интеграл такого рода называют *циркуляцией* вектора E .

В электростатическом поле нет замкнутых силовых линий. Потенциал электростатического поля всюду, во всех участках поля, имеет некоторые вполне определенные значения, он всюду *однозначен*. Циркуляция напряженности электростатического поля по всем замкнутым линиям равна нулю. Электродвижущие силы отсутствуют.

Но если в электростатическое поле внести проводник, который с о е д и н и т заряженные тела, имевшие какую-то разность потенциалов, то равновесие нарушится, *деформированное поле уже не будет электростатическим* и существовавшая разность потенциалов сделается хотя бы кратковременно источником электродвижущей силы.

Особое, практическое значение имеет случай, когда замыкается цепь, содержащая проводники второго рода. В этом случае разность потенциалов при нарушении равновесия поддерживается действием электрохимических сил.

Электрическое поле разомкнутой цепи, содержащей гальванический элемент или аккумулятор, мало отличается от поля той же цепи, но замкнутой проводом, имеющим чрезвычайно большое сопротивление. Но в последнем случае в цепи циркулирует хотя бы исчезающе малый ток и ясно обнаруживается *замкнутость линии тока*, так как электричество нигде не накапливается, а, стало быть, обнаруживается также замкнутость хотя бы небольшой части силовых линий. С другой стороны, очевидно, что при разомкнутой цепи электрохимические силы и процессы, которые побуждают внутри электролита положительные заряды перемещаться к аноду ¹⁾, уравновешены электростатическим отталкиванием положительных зарядов, уже собравшихся на аноде. Аналогичное равновесие существует и у другого электрода, зарядившегося отрицательно, — у катода ²⁾. Иначе говоря, итоговое, суммарное электрическое поле внутри электролита при разомкнутой цепи отсутствует. При замыкании внешней цепи проводником, имеющим чрезвычайно большое

¹⁾ От греч. anodos — п у т ь в в е р х.

²⁾ От греч. kathodos — с х о ж д е н и е, с п у с к.

сопротивление, поле внутри электролита едва определяется; оно будет обладать ничтожной суммарной напряженностью, т. е. ничтожной плотностью силовых линий, идущих здесь от катода к аноду (рис. 68). Так образуются замкнутые силовые линии, и из большого числа силовых линий внешнего поля между электродами замыкаются именно те линии, которые, нарушая электростатическое равновесие, создают поле в проводнике, замкнувшем цепь. Поскольку при состоянии, близком к равновесию, напряженность итогового электрического поля в электролите близка к нулю, то очевидно, что вычисление электродвижущей силы по формуле (1) в этом случае даст разность потенциалов на электродах:

$$\mathcal{E} = \oint E \, dl = V^+ - V^-.$$

Итак, электродвижущая сила в цепи, содержащей гальванический элемент или аккумулятор, равна разности потенциалов, которая устанавливается на полюсах этой цепи в разомкнутом состоянии (при этом имеется в виду, что цепь разомкнута правильно, т. е. что ее полюсы представляют собой проводники, одинаковые по своей химической природе). Сказанное справедливо и для других источников («генераторов») тока.

Рис. 68. При замыкании полюсов гальванического элемента в проводящей цепи образуются замкнутые силовые линии электрического поля.

Электродвижущая сила, создаваемая электрической машиной, равна разности потенциалов на ее разомкнутых клеммах.

Определяя электродвижущую силу по формуле (1), нередко расчленяют напряженность поля на два слагаемых: на «кулонову» силу $E^{\text{кул}}$, создаваемую в данной точке поля электростатическим действием зарядов, и на силу неэлектростатического происхождения, которую в этом смысле называют «сторонней», $E^{\text{стор}}$:

$$E = E^{\text{кул}} + E^{\text{стор}}.$$

Считая, что для кулоновой части напряженности поля циркуляция равна нулю,

$$\oint E^{\text{кул}} \, dl = 0,$$

можно уравнение (1) переписать так:

$$\mathcal{E} = \oint E \, dl = \oint E^{\text{стор}} \, dl. \quad (2)$$

Стало быть, *электродвижущую силу можно рассматривать как энергию, вносимую в цепь тока действием сторонних сил*¹⁾.

Когда движение электрических зарядов происходит стационарно, т. е. когда по проводнику течет постоянный электрический ток, электрическое поле в н е проводника имеет много общего с электростатическим полем (потенциал здесь однозначен) и замкнутые силовые линии образуются только в поле в н у т р и проводника. Понятно, что поверхность проводника, по которому протекает постоянный ток, не является эквипотенциальной поверхностью, как в электростатическом поле. Вдоль проводника в направлении тока потенциал падает. Силовые линии внешнего электрического поля пересекают поверхность проводника, по которому течет постоянный ток, не перпендикулярно, как в электростатическом поле, а наклонно.

В конце § 11 было упомянуто, что потенциал проводника по отношению к земле часто называют *напряжением*.

Если в цепи поддерживается постоянный и не чрезмерно малый ток, то на полюсах генератора тока устанавливается разность потенциалов, меньшая, чем электродвижущая сила. Эту разность потенциалов называют *напряжением тока* (один из полюсов генератора тока часто бывает заземлен; но термин «напряжение тока» сохраняют и тогда, когда ни один из полюсов не заземлен). Иногда вместо «напряжения тока» говорят «вольтаж». Итак, *напряжение представляет собой часть электродвижущей силы и указывает работу, которую можно получить перемещая единицу положительного электричества «прямо»* (т. е. без совершения циклов по замкнутым силовым линиям) *от одного полюса генератора тока к другому полюсу по внешней цепи тока*.

Разность потенциалов в проводнике на каком-либо участке цепи тока часто называют *падением напряжения* (конечно, и в этом случае и вообще всегда, если не оговорено иное, разность потенциалов или падение напряжения определяют при «прямом» перемещении

¹⁾ Уравнение (2) является более узким, чем (1). Например, кратковременные электродвижущие силы, создающиеся при «распаде электростатического поля» и вызывающие разрядный ток, не учитываются уравнением (2). Многие авторы выделяют из «сторонних» сил еще ту силу, которая проявляется при электромагнитной индукции; тогда токи, возникающие в проводнике, когда он движется в магнитном поле, рассматривают, не вводя представления об индуцированных электродвижущих силах. Этим еще больше сужают трактовку электродвижущих сил, и в этом случае считают их происходящими только вследствие контакта разнородных тел. Если еще принять во внимание, что молекулярное электрическое поле, проявляющееся при электрохимических процессах, частью обусловлено кулоновым действием зарядов, связанных с ионами, а также электромагнитным действием внутриаиомных зарядов, то становится очевидной крайняя условность представления о «сторонних» силах. В данном курсе трактовка электродвижущих сил по уравнению (2) упоминается только потому, что она принята в ряде других учебных руководств.

единицы заряда, т. е. без осуществления циклов по замкнутым силовым линиям).

Можно сказать, что если электродвижущая сила представляет собой меру энергии, вносимой в цепь тока при перемещении по цепи тока единицы заряда, то *напряжение тока представляет собой меру энергии, которая может быть отдана током во внешней цепи* также при перемещении единицы заряда.

В замкнутой цепи тока может быть объединено несколько источников тока. Их действие может или взаимно усиливаться, складываться, или же, при противоположном направлении создаваемого ими поля, взаимно ослабляться. Результирующая электродвижущая сила и в этом случае определяется так же, как и при наличии только одного источника тока, т. е. по уравнению (1). Результирующая электродвижущая сила, действующая в этом случае в цепи тока, равна алгебраической сумме электродвижущих сил, создаваемых отдельными источниками тока.

Из самого определения и физического смысла величин электродвижущей силы и падения напряжения следует, если принять во внимание принцип сохранения энергии, что *электродвижущая сила, действующая в замкнутой проводящей цепи, равна сумме падений напряжения во внешней части цепи и внутри источника тока:*

$$\mathcal{E} = \Delta V_{\text{внеш}} + \Delta V_{\text{внутр}}.$$

Когда цепь тока объединяет несколько источников тока, то *резльтирующая электродвижущая сила, представляющая собой алгебраическую сумму электродвижущих сил всех источников тока, равна алгебраической сумме падений напряжения на всех участках проводящей цепи:*

$$\mathcal{E}_{\text{рез}} = \sum \mathcal{E} = \sum \Delta V. \quad (3)$$

Цепь электрического тока всегда является замкнутой. Часто цепь тока является вместе с тем замкнутой цепью проводников. При постоянном токе электричество нигде не накапливается; это прямо указывает на то, что движение электричества происходит по замкнутым линиям.

При токе, который не постоянен по величине, цепь тока может замыкаться через конденсатор. В этом случае в диэлектрике, который заполняет пространство между обкладками конденсатора, происходит смещение зарядов, сопутствующее изменению электрической поляризации диэлектрика. В совершенном вакууме между обкладками конденсатора, замыкающего цепь тока, происходят явления, сущность которых еще недостаточно выяснена, но которые соответствуют деформации фарадеевых силовых трубок. Об этих видах электрического тока в диэлектриках и в вакууме (о *токах смещения*) подробнее сказано ниже, при пояснении уравнений Максвелла (§ 76).

В ближайших главах рассматриваются обычный электрический ток *проводимости*, т. е. движение зарядов в проводниках первого и второго рода, а также явления электрического *пробоя* диэлектриков и *электронного и ионного тока в вакууме*.

Об одном из видов электрического тока — о *конвекционном токе*, когда движение зарядов в разрыве проводящей части цепи происходит совместно с перемещением капелек, крупинок или макроскопических масс вещества, связанных с перемещающимися зарядами, некоторые сведения уже сообщены в § 24, дополнительные сведения даны в § 76.

В ближайших главах излагается электрофизика *постоянного тока*. Далее будут рассмотрены способы возбуждения, свойства и некоторые применения *переменного тока*. Заключительные главы данной части курса посвящены обзору особых свойств и важнейших применений *быстропеременных токов* — электрических колебаний.

§ 26. Закон Ома. Законы Кирхгофа

На основе многочисленных опытов и руководствуясь формальной аналогией между постоянным электрическим током и установившимся, спокойным током жидкости, Ом в 1827 г. открыл закон, чрезвычайная точность которого была позже подтверждена самыми тщательными измерениями.

Закон Ома гласит:

Величина тока пропорциональна падению напряжения, т. е. разности потенциалов на концах проводника, и обратно пропорциональна сопротивлению проводника:

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R}. \quad (4)$$

Сопротивление же R , как показал Ом, зависит от длины проводника l , от площади его поперечного сечения S и, наконец, от того материала, из которого он изготовлен. Эта зависимость выражается формулой

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (5)$$

Таким образом, *сопротивление проводника прямо пропорционально его длине и обратно пропорционально площади сечения*.

Коэффициент ρ , зависящий от материала проводника, называют его *удельным сопротивлением*.

Вместо понятия о сопротивлении проводника R часто применяют понятие о его *электропроводности*, подразумевая под этим величину, обратную величине сопротивления.