

10 ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ЗАКОН ОМА

Электрическим током называется упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц в пространстве. В связи с этим свободные заряды принято называть также **носителями тока**. Направленное движение заряженных частиц приводит к переносу электрического заряда через некоторую поверхность, например, через сечение проводника.

Например, в металлах электроны проводимости совершают хаотическое тепловое движение, сталкиваясь с ионами, образующими кристаллическую решётку металла. Эти соударения приводят к установлению теплового равновесия между электронами и кристаллической решёткой. При помещении металла во внешнее электрическое поле электроны начинают дополнительно совершать упорядоченное движение, направление которого противоположно направлению вектора напряжённости электрического поля. Таким образом, возникает электрический ток.

Для характеристики тока вводится **вектор плотности тока**, который определяется следующим образом:

$$\vec{j} = \frac{1}{\Delta V} \sum_i q_i \vec{v}_i, \quad (10.1)$$

где q_i - заряд i -ой частицы, \vec{v}_i - скорость её упорядоченного движения, суммирование производится по всем частицам, находящимся внутри физически малого объема ΔV .

Введя среднюю скорость упорядоченного движения заряженных частиц $\langle \vec{v} \rangle$, можно записать

$$\vec{j} = qN\langle \vec{v} \rangle = \rho\langle \vec{v} \rangle, \quad (10.2)$$

где q - заряд частицы;

N - концентрация свободных носителей заряда;

$\rho = qN$ - объемная плотность электрического заряда свободных частиц.

При получении соотношения (10.2) использовано предположение, что все свободные частицы имеют одинаковый заряд q .

Из формулы (10.2) следует, что направление вектора плотности тока совпадает с направлением упорядоченного движения положительно заряженных частиц. Если же свободные частицы заряжены отрицательно, как электроны проводимости в металлах, то вектор плотности тока направлен противоположно скорости упорядоченного движения свободных зарядов.

Силой тока через некоторую поверхность (S) называется отношение заряда dq , прошедшего через эту поверхность за промежуток времени dt , к длительности этого отрезка времени:

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (10.3)$$

Единицей измерения силы тока является ампер [А]. В международной системе единиц СИ один ампер определяется через величину силы взаимодействия двух параллельных очень длинных проводников с током, находящихся на расстоянии один метр друг от друга. Согласно (10.3), единица измерения заряда может быть определена следующим образом: $1\text{Кл} = 1\text{А} \cdot 1\text{с}$.

Сила тока выражается через плотность тока следующим образом:

$$I = \int_{(S)} \vec{j} d\vec{S}. \quad (10.4)$$

Здесь (S) - поверхность произвольной формы, сквозь которую проходит электрический ток, например, сечение проводника, $d\vec{S}$ - вектор, характеризующий элемент поверхности (S) .

Из соотношения (10.4) следует, что плотность тока измеряется в единицах $\text{А}/\text{м}^2$.

Формула (10.4) учитывает возможность изменения плотности тока в зависимости от координаты в пределах выбранной поверхности (S) . Если вектор плотности тока \vec{j} является постоянным на всей поверхности (S) и направлен ортогонально этой поверхности, то соотношение (10.4) принимает вид

$$I = jS, \quad (10.5)$$

где S - площадь рассматриваемой поверхности, например, поперечного сечения проводника.

Закон сохранения электрического заряда - один из фундаментальных законов природы, он следует из опытных фактов. Во-первых, заряд любой частицы является инвариантным, то есть не зависит от скорости движения частицы (см. раздел 1). Доказательством инвариантности заряда является электрическая нейтральность атомов. Во-вторых, суммарный электрический заряд системы частиц не изменяется при любых взаимопревращениях частиц. Следовательно, электрический заряд замкнутой системы частиц остается постоянным. Электрический заряд является свойством частицы и отдельно от своих носителей существовать не может. В то же время электрический заряд является в некотором смысле самостоятельной величиной, поскольку не изменяется при взаимопревращениях частиц. В соответствии с законом сохранения электрического заряда изменение заряда в некоторой области (V) может произойти только в результате движения заряженных частиц через замкнутую поверхность (S) , ограничивающую область. Изменение суммарного заряда Q в области (V) можно характеризовать производной

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{(V)} \rho dV, \quad (10.6)$$

где ρ - объёмная плотность электрического заряда.

Поскольку заряд переносится через поверхность (S) , ограничивающую область (V) , мы можем характеризовать это движение частиц силой тока

$$I = \oint_{(S)} \vec{j} d\vec{S}, \quad (10.7)$$

при этом положительная нормаль, как и ранее, направлена наружу относительно области (V) .

Используя соотношения (10.3), (10.6) и (10.7), получаем

$$\frac{d}{dt} \int_{(V)} \rho dV = - \oint_{(S)} \vec{j} d\vec{S}. \quad (10.8)$$

Здесь знак «минус» учитывает, что при движении положительно заряженных частиц наружу сила тока является положительной величиной, в то время как заряд внутри области уменьшается.

Соотношение (10.8) представляет собой закон сохранения электрического заряда в интегральной форме. Используя теорему Остроградского - Гаусса (2.7), это закон можно записать также в дифференциальной форме

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \vec{j} = 0. \quad (10.9)$$

Уравнение (10.9) называется также **уравнением непрерывности**.

В соотношении (10.9) используется символ частной производной по времени, поскольку область (V) и её граница (S) не изменяются с течением времени.

Закон Ома для участка цепи гласит: если состояние проводника остаётся неизменным (не изменяется его температура и т.д.), то сила тока I на участке цепи прямо пропорциональна приложенному напряжению U :

$$I = \frac{U}{R}, \quad (10.10)$$

где R - **сопротивление участка цепи**, играющее роль коэффициента пропорциональности.

Единицей измерения сопротивления является ом (Ом).

В формуле (10.10) напряжение U , как и ранее, равно разности потенциалов $\Delta\varphi$ (см. раздел 3).

Для линейного однородного проводника круглого сечения сопротивление пропорционально его длине Δl и обратно пропорционально площади поперечного сечения S :

$$R = \rho \frac{\Delta l}{S}, \quad (10.11)$$

где ρ - *удельное сопротивление вещества*.

Удельное сопротивление вещества измеряется в единицах Ом·м.

Следует различать удельное сопротивление вещества и объёмную плотность электрического заряда, которые в электричестве традиционно имеют одинаковое обозначение ρ .

Характеристикой проводника является также его *проводимость*, которая связана с сопротивлением проводника обратной зависимостью

$$\Gamma = \frac{1}{R}. \quad (10.12)$$

Единицей измерения проводимости в системе СИ является *сименс* (См). Согласно (10.10) $1\text{См} = 1\text{Ом}^{-1}$.

Закон Ома можно записать также *в дифференциальной форме*:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}. \quad (10.13)$$

Здесь σ - удельная проводимость вещества, то есть величина, обратная его удельному сопротивлению:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (10.14)$$

Закон Ома в дифференциальной форме показывает, что именно электрическое поле является причиной существования электрического тока в любом физически малом объеме проводника. Прохождение электрического тока внутри проводника свидетельствует, что в объеме проводника обязательно существует электрическое поле. Если электрический ток в проводнике отсутствует, то из закона Ома в дифференциальной форме (10.13) следует $\vec{E} = 0$, то есть мы приходим к ранее рассмотренному случаю экранировки внешнего электрического поля проводником.

Опыт показывает, что снаружи проводника с током вблизи его поверхности вектор напряжённости электрического поля направлен под углом к поверхности проводника. Это значит, что вектор \vec{E} имеет как тангенциальную составляющую, так и нормальную составляющую относительно поверхности. В соответствии с формулой (4.4) наличие нормальной составляющей поля означает существование поверхностных зарядов на проводнике. Именно свободные заряды, сосредоточенные на

поверхности проводника, создают электрическое поле внутри проводника. Это поле, в свою очередь, обеспечивает существование тока внутри проводника.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМ. Ф. СКОРИНЫ