

II. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

§ 21. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Как указывалось выше, электростатическое поле вызывает в проводниках перемещение свободных зарядов (ток) до тех пор, пока поле перераспределившихся зарядов не скомпенсирует первичное поле; при этом сами заряды займут в проводниках определенное положение. Отсюда вытекает, что для поддержания непрерывного течения зарядов в проводнике в нем должно постоянно существовать электрическое поле*. Такое электрическое поле уже не является электростатическим; постоянное во времени электрическое поле, вызывающее в проводнике постоянный электрический ток (т. е. ток, одинаковый в любом поперечном сечении неразветвленной цепи), принято называть стационарным полем. Наличие в проводнике стационарного электрического поля равносильно существованию постоянной разности потенциалов на концах проводника, поэтому обычно говорят, что для существования постоянного тока в проводнике нужно создать и поддерживать на его концах постоянную разность потенциалов (постоянное напряжение).

Рассмотрим процесс установления электрического тока в цепи. Пусть цепь разомкнута с помощью двухполюсного рубильника (рис. 39, а). В верхней

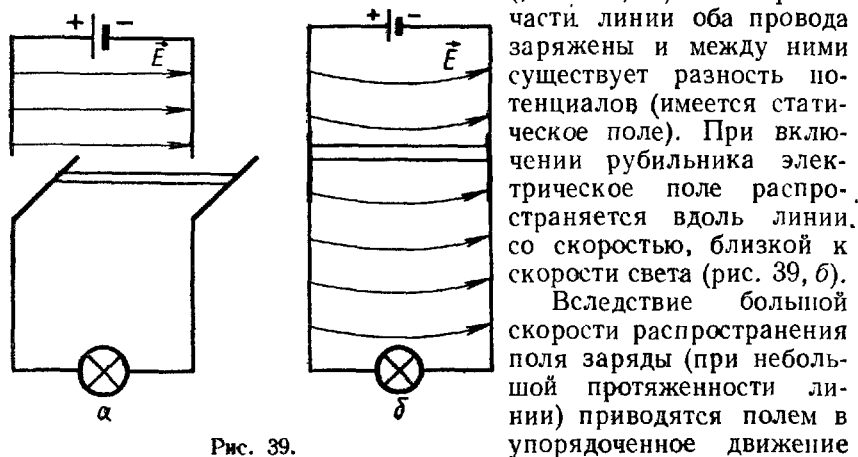


Рис. 39.

* Это требование не относится к случаю тока в замкнутой сверхпроводящей цепи.

почти одновременно во всей линии. При этом конкретные носители тока в металлах (электроны проводимости) имеют очень небольшую скорость упорядоченного движения—порядка миллиметра в секунду; полезно сопоставить эту величину со средней скоростью хаотического (теплого) движения электронов проводимости в металлах, равной при комнатной температуре около 1000 км/с. После кратковременного переходного режима (длительность которого зависит от сопротивления и индуктивности линии) в проводах цепи и в окружающем их пространстве устанавливается постоянное во времени поле—стационарное (иногда его называют кулоновским стационарным полем).

Как уже указывалось, электрическое поле в цепи должно непрерывно поддерживаться извне, иначе говоря, для совершения работы непрерывного перемещения зарядов необходим постоянный источник энергии неэлектростатического происхождения (механический, тепловой, химический и т. д.). В этом источнике должно происходить непрерывное превращение какого-либо вида энергии в электрическую. Такой процесс протекает в источниках электродвижущей силы; этими источниками создается поле, называемое в силу своей неэлектростатической природы сторонним полем. Роль этого стороннего поля заключается в том, чтобы непрерывно поддерживать стационарный режим в цепи. При этом режиме на поверхности проводников, составляющих цепь, сосредоточены заряды, плотность которых, несмотря на их движение, в каждой данной точке проводника со временем не изменяется.

Внутри проводников и вне их локализовано стационарное поле, движущее заряды как вдоль поверхности, так и по всему сечению проводника. На рисунке 40 наглядно показаны распределение поверхностных зарядов и конфигурация силовых линий в поле тока. Цепь изображена в виде толстого кольца, в зазор которого включен источник электродвижущей силы, поддерживающей между зажимами A и B разность потенциалов. Внутри проводника силовые линии имеют форму окружностей, concentрических с проводником. В окружающем пространстве силовые линии расположены под углом к проводнику.

Таким образом, вектор \vec{E} имеет на поверхности проводника нормальную и касательную составляющие. Нормальная составляющая при обходе цепи (см. рис. 40) по часовой стрелке по мере удаления от источника убывает, в средней части проходит через нуль, а справа меняет

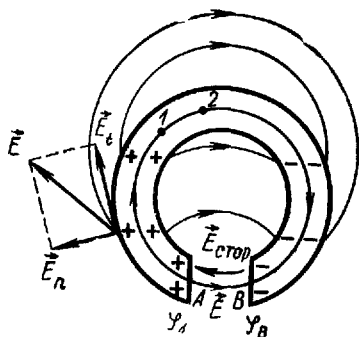


Рис. 40

свое направление (входит в проводник). Соответственно левая часть проводника заряжена положительно, правая — отрицательно.

Источник электродвижущей силы, а следовательно, и стороннее поле, действует только на участке BA ; благодаря ему положительные заряды перемещаются от более низкого потенциала φ_B к более высокому φ_A против стационарного поля, направленного здесь от A к B .

Между любыми двумя точками проводника, не лежащими в одном и том же поперечном сечении (например, между точками 1 и 2 на рис. 40), существует разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ (напряжение U), которая математически определяется криволинейным интегралом

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U = - \int_2^1 E_t dt = \int_1^2 E_t dt.$$

Учитывая это соотношение, записываем закон Ома для участка цепи в интегральной форме:

$$U = \int_1^2 E_t dt = IR, \quad (21.1)$$

где I — сила тока в цепи, R — активное (омическое) сопротивление участка цепи между точками 1 и 2 .

Выражение (21.1) справедливо для участка цепи, в котором действует только стационарное поле и нет источников электродвижущей силы. Между тем, часто приходится иметь дело с участками цепи с включенными источниками сторонних ЭДС. Пусть, например, в участок цепи включен под зарядку аккумулятор. Закон Ома для этого участка цепи записывается так:

$$I = \frac{U - \mathcal{E}_{\text{стор}}}{R}, \quad (21.2)$$

где $\mathcal{E}_{\text{стор}}$ — электродвижущая сила включенного аккумулятора. В общем случае знак перед $\mathcal{E}_{\text{стор}}$ может быть и положительным, поэтому

$$I = \frac{U \pm \mathcal{E}_{\text{стор}}}{R}. \quad (21.3)$$

С электродвижущей силой $\mathcal{E}_{\text{стор}}$ связано стороннее поле с напряженностью $\vec{E}_{\text{стор}}$, причем

$$\mathcal{E}_{\text{стор}} = \int_l \vec{E}_{\text{стор}} d\vec{l} = \int_l E_{t, \text{стор}} dl, \quad (21.4)$$

где l — участок цепи, в котором действует ЭДС. С учетом выражений (21.4) и (21.1) можно переписать закон Ома для участка цепи со сторонней ЭДС (21.3) следующим образом:

$$IR = \int_l (E_t dl + E_{t, \text{стор}} dl). \quad (21.5)$$

Рассмотрим циркуляцию векторов \vec{E} и $\vec{E}_{\text{стор}}$ по замкнутому контуру цепи (содержащей источник и внешнюю цепь). Стационарное поле образовано зарядами и является потенциальным полем, поэтому циркуляция электрического вектора стационарного поля равна нулю. В самом деле, при определении циркуляции вектора \vec{E} вдоль цепи (см. рис. 40) мы обходим внешнюю цепь на пути AB по полю, а затем участок BA против поля кулоновских сил. Для всей цепи, с учётом ее полного сопротивления $R+r$ (где r — сопротивление источника сторонней ЭДС), закон Ома записывается в виде

$$I(R+r) = \oint_L (E_t dl + E_{t, \text{стор}} dl) = \oint_L E_{t, \text{стор}} dl = \mathcal{E}_{\text{стор}}. \quad (21.6)$$

Отсюда вытекает определение ЭДС как циркуляции вектора $\vec{E}_{\text{стор}}$ по замкнутой цепи или как полного падения напряжения на сопротивлении R внешней цепи и на сопротивлении r источника:

$$\mathcal{E} = IR + Ir. \quad (21.7)$$

Здесь $IR = U$ представляет собой напряжение на зажимах источника, Ir — потеря напряжения внутри источника. Как известно, U зависит от нагрузки, т. е. от величины тока. При уменьшении внешнего сопротивления (т. е. при росте нагрузки) возрастает потеря напряжения внутри источника Ir , и, поскольку ЭДС исправно действующего источника практически неизменна, соответственно убывает $U = IR$.

§ 22. ЗАКОН ОМА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ

Как в практических приложениях, так и в теории весьма важное значение имеет понятие плотности тока (ток, протекающий через единицу поперечного сечения проводника). Пусть S_0 — поперечное сечение однородного проводника (рис. 41), тогда при постоянном токе плотность тока определяется как частное:

$$j = \frac{I}{S_0}. \quad (22.1)$$

В общем случае неравномерного распределения тока по площади S_0 надо от частного (22.1) перейти к производной:

$$j = \frac{dI}{dS_0}. \quad (22.2)$$

Выражения (22.1) и (22.2) определяют численное значение плотности тока; плотность тока \vec{j} — вектор, направление которого совпадает с направле-

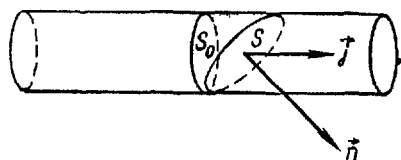


Рис. 41