

Как часто бывает, аналогия, распространяемая слишком далеко, приводит к ошибкам. Так, Ом из того, что температура пропорциональна количеству теплоты, ошибочно заключил, что и «электроскопическая сила» в проводнике пропорциональна количеству электричества в каждой его точке. Решая задачу о распространении потенциала вдоль цепи тока, Ом полагал, что тем самым находит количество электричества в соответствующих местах проводника.

Закон, открытый Омом и носящий его имя, далеко не сразу получил признание. Еще в 30-х годах по его поводу высказывали сомнения и отмечали ограниченность его применения. Однако в ряде работ различных физиков, применивших более совершенные методы измерения, выводы Ома были подтверждены и его закон получил всеобщее признание. При этом были также исправлены ошибочные представления Ома.

Кирхгоф в работах, относящихся к 1845—1848 гг., уточнил понятие «электроскопической силы». Он установил тождественность понятия этой величины и понятия потенциала в электростатике. Кирхгоф также установил общеизвестные правила для электрических цепей.

Спустя более чем 15 лет после открытия закона Ома был установлен закон, определяющий количество теплоты, выделяемой электрическим током в цепи; он был установлен экспериментально англичанином Джоулем (1843) и независимо от него петербургским академиком Э. Х. Ленцем (1844). В настоящее время его называют законом Джоуля — Ленца.

и т

#### **§ 41. ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ**

Открытие явления электромагнитной индукции — важнейшее открытие в области электродинамики. Еще в 1824 г. Араго, пытаясь с помощью магнитной стрелки определить присутствие железа в красной меди, обнаружил, что немагнитные вещества тормозят колебательное движение подвешенной магнитной стрелки. Затем он установил, что при вращении медной пластинки возле подвижного магнита последний стремится вращаться в том же направлении, и, наоборот, если вращать магнит, то пластинка в свою очередь стремится следовать за ним.

Опыт Араго сумел объяснить только Фарадей, открывший явление электромагнитной индукции. Фарадею принадлежит много других открытий в области электричества и магнетизма. О его роли в развитии этого раздела физики будет сказано ниже, сейчас же рассмотрим лишь историю открытия явления электромагнитной индукции. Она напоминает историю открытия Эрстедом действия электрического тока на магнитную стрелку. Эрстед руководствовался идеей о связи между электричеством и магнетизмом, а Фарадей — идеей о взаимной превращаемости «сил природы». У Фарадея возникла мысль, что если электрический ток способен вызы-

вать магнитные действия, то и магнетизм должен вызывать электрические явления. В 1823 г. он записывает в своем дневнике эту мысль: «Обратить магнетизм в электричество»<sup>1)</sup>. В течение восьми лет он настойчиво работал над поставленной задачей и в 1831 г. решил ее. Впервые явления электромагнитной индукции Фарадей наблюдал на следующем опыте:

«Двести три фута медной проволоки в одном куске были намотаны на большой деревянный барабан; другие двести три фута такой же проволоки были положены в виде спирали между витками первой обмотки, причем металлический контакт был везде устроен посредством шнурка. Одна из этих спиралей была соединена с гальванометром, а другая — с хорошо заряженной батареей из ста пар пластины в четыре квадратных дюйма с двойными медными пластинами. При замыкании контакта наблюдалось внезапное, но очень слабое действие на гальванометр, и подобное же слабое действие имело место при размыкании контакта с батареей. Но в дальнейшем, при прохождении гальванического тока по одной из спиралей, не удавалось обнаружить отклонение гальванометра или иного действия на вторую спираль, похожего на индукцию, хотя мощность батареи и была явно велика, о чем можно было судить по нагреванию всей присоединенной к ней спирали и по яркости разряда, если он пропускался через древесный уголь»<sup>2)</sup>.



Эмилий Христианович Ленц

На основе этого опыта Фарадей сделал вывод, что «ток от батареи при пропускании его через один проводник действительно индуцирует подобный же ток в другом проводнике, но что этот ток длится всего один момент...»<sup>3)</sup>

Проводя дальнейшие экспериментальные исследования, Фарадей открыл, в частности, случай «образования электричества из магнетизма», когда в проволочной катушке возникал электрический ток в результате движения внутри нее магнита.

Первый существенный шаг в направлении детального количественного изучения явления электромагнитной индукции был сделан петербургским академиком Эмилием Христиановичем Ленцем (1804—1865). Ленц изучал, как зависит индукционный ток в проволочной катушке от ее параметров, используя баллистический гальванометр. При этом он получил ряд новых результатов. В частности, установил, что э.д.с., индуцируемая в катушке, пропорциональна числу витков и не зависит от их диаметра и т. д.

<sup>1)</sup> Jones B. The Life and Letters of Faraday. Vol. I. London, 1870, p. 301.

<sup>2)</sup> Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству. Т. I. Изд-во АН СССР, 1947, с. 13—14.

<sup>3)</sup> Там же, с. 14.

Самый важный результат, полученный Ленцем,— установление правила, или закона, носящего его имя. Фарадей, открыв явление электромагнитной индукции, в первых своих работах не привел общее правило для определения направления индукционного тока. Исследуя явление электромагнитной индукции, Ленц установил это правило. В его редакции оно формулируется так:

*«Если металлический проводник движется поблизости от гальванического тока или магнита, то в нем возбуждается гальванический ток такого направления, что если бы данный проводник был неподвижным, то ток мог бы обусловить его перемещение в противоположную сторону; при этом предполагается, что покоящийся проводник может перемещаться только в направлении движения или в противоположном направлении»<sup>1)</sup>.*

Исторически закон Ленца послужил одним из источников построения математической теории электромагнитной индукции. Впервые математическую теорию электромагнитной индукции начал разрабатывать Ф. Нейман (1798—1895) в работах, относящихся к 1845—1847 гг. При определении величины электродвижущейся силы индукционного тока Нейман использовал две основные гипотезы. Согласно первой гипотезе, электродвижущая сила индукции  $d\varphi$ , возникающая в элементе линейного проводника  $dl$  в результате его движения относительно контура с постоянным током  $i$  или магнита, пропорциональна скорости этого движения  $v$ . Эта гипотеза следует из экспериментальных данных, полученных Фарадеем и другими. Вторая гипотеза заключается в том, что электродвижущая сила индукции в проводнике пропорциональна проекции на направление его движения силы  $F_v dl$  ( $F$  — сила на единицу длины проводника), которая действует на него со стороны контура с током или магнита, когда по нему протекает индукционный ток, равный единице. Эта гипотеза возникла у Неймана под влиянием закона Ленца, который как раз устанавливает связь между электромагнитной индукцией и силами, действующими между токами или током и магнитом. Таким образом, Нейман полагает, что

$$d\varphi = -kvF_v dl,$$

где  $k$  — постоянный коэффициент, определяемый выбором единиц.

Учитывая выражение силы  $F$  (используя закон Ампера или Био — Савара), можно получить, что количество электричества  $dq$ , протекшее через сечение проводника за время  $dt$  его бесконечно малого перемещения (Нейман называет эту величину дифференциальным током), равно

$$dq = -\frac{a}{R} d\Phi^{2)}$$

Здесь  $a$  — постоянная;  $R$  — сопротивление проводника;  $\Phi$  — функ-

<sup>1)</sup> Ленц Э. Х. Избранные труды. Изд-во АН СССР, 1950, с. 148—149.

<sup>2)</sup> Эта функция, как выяснилось позже, дает значение магнитного потока через рассматриваемый контур, а полученное выражение приводится к виду  $\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{d\Phi}{dt}$ .

ция, зависящая от конфигурации и взаимного расположения проводника и контура с током или проводника и магнита, а также от величины тока в контуре или магнитной массы.

Если теперь определить «интегральный ток», т. е. количество электричества, протекающее в проводнике за конечное время при конечном перемещении проводника, то оно определяется разностью значений  $\Phi_2$  и  $\Phi_1$  и, следовательно, зависит только от его конечного и начального положений. Поэтому Нейман назвал функцию  $\Phi$  потенциальной функцией магнита и проводника или проводника и контура тока.

Для случая двух линейных контуров  $L_1$  и  $L_2$  ( $L_1$  — контур, в котором индуцируется электродвижущая сила) Нейман показал, что (в современных обозначениях)

$$\Phi = aI_2 \oint_{L_1} \oint_{L_2} \frac{(dl_1 dl_2)}{r},$$

где  $I_2$  — сила тока во втором контуре; в этом случае

$$dq = -\frac{aI_2}{R} d \oint_{L_1} \oint_{L_2} \frac{(dl_1 dl_2)}{r}.$$

Наконец, Нейман выяснил, что с помощью потенциальной функции просто определяется пондермоторная сила взаимодействия проводников с током. В этом случае потенциальная функция

$$U = -a^2 L_1 L_2 \oint_{L_1} \oint_{L_2} \frac{(dl_1 dl_2)}{r};$$

соответственно пондермоторная сила  $F_\alpha$  равна

$$F_\alpha = -\frac{\partial U}{\partial \alpha} = a^2 L_1 L_2 \frac{\partial}{\partial \alpha} \oint_{L_1} \oint_{L_2} \frac{(dl_1 dl_2)}{r}.$$

Новые соображения по поводу закона электромагнитной индукции были высказаны в 1845 г. немецким ученым Фехнером, который объяснял явление электромагнитной индукции, исходя из представления о силах, действующих между движущимися зарядами. Он предполагал, что электрический ток есть одновременное движение по проводнику положительных и отрицательных электрических частиц в противоположных направлениях с одинаковыми по абсолютной величине скоростями. При этом он считал, что электрические частицы взаимодействуют между собой по закону Кулона, только если они находятся в покое. Если же они движутся, то силы, действующие между ними, иные, зависящие от скоростей и направления движения. Это следует, по его мнению, из закона Ампера, из которого можно определить и зависимость таких сил от скорости и направления движения. По Фехнеру, если два одноименных заряда движутся в одном направлении, сближаясь, то они должны притягиваться. Должны притягиваться и два разноименных заряда, если они движутся в противоположных направлениях. В противном случае действуют силы отталкивания.

Если принять предположение Фехнера, то действительно можно дать качественное объяснение явлению электромагнитной индукции. Пусть, например, по проводнику  $I$  течет ток, т. е. вдоль него в противоположных направлениях движутся положительные и отрицательные заряды. Если теперь вблизи проводника  $I$  поместить проводник  $II$  без тока, то на содержащиеся в нем в покое положительные и отрицательные заряды хотя и действуют силы со стороны движущихся в первом проводнике зарядов, однако равнодействующая этих сил на каждый из зарядов равна нулю и никакого тока во втором проводнике не возникает. Иначе обстоит дело, если проводник  $II$  заставить двигаться, например приближаться к первому. Тогда равновесие сил, действующих на его заряды, нарушится, они придут в движение и по проводнику  $II$  потечет ток (в данном случае, как легко видеть, в противоположную сторону).

Идеи Фехнера были положены в основу теории электромагнитных явлений, развитой в 1846 г. В. Вебером (1804—1891). Он также исходит из представления, что электрический ток представляет собой движение положительных и отрицательных электрических зарядов в противоположные стороны. Между зарядами действуют силы притяжения и отталкивания, зависящие от расстояния, а также от их относительной скорости и ускорений.

Для того чтобы установить выражение для силы, действующей между электрическими зарядами, Вебер обращается к закону Ампера. Учитывая, что сила тока пропорциональна величине движущихся зарядов и их скорости, а также принимая во внимание закон Кулона. Вебер определяет, что сила, действующая между двумя электрическими зарядами  $e$  и  $e'$ , такова:

$$F = \frac{ee'}{r^2} \left[ 1 - a^2 \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + 2a^2 r \left( \frac{d^2r}{dt^2} \right) \right].$$

Здесь  $a$  — постоянная,  $r$  — расстояние между зарядами, а сила направлена по прямой, соединяющей заряды.

Закон Вебера имел общий характер. Для случая неподвижных зарядов из этого закона непосредственно следовал закон Кулона. Из закона Вебера можно вывести закон Ампера. Наконец, этот закон можно было использовать для количественной теории электромагнитной индукции, получив те же результаты, что и Нейман. Таким образом, теория Вебера объединила основные известные тогда законы электрических и магнитных явлений. Она являлась в известном смысле вершиной в развитии домаквелловской электродинамики (электродинамики, основанной на принципе дальнего действия).

## § 42. МАЙКЛ ФАРАДЕЙ

В первой половине XIX в., как уже говорилось, взгляды на электрические и магнитные явления основывались на представлении о дальнем действии. Такое положение имело место до появления работ Максвелла, точнее, до их признания. Однако уже в первой по-