**Работы Майкла Фарадея**

Марио Льоцци

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

То, что все физические явления представляют собой лишь различные проявления одной и той же сущности, или, говоря словами Анджело Секки (1818—1879), идея «единства физических сил», было основной философской предпосылкой физики прошлого века. Систематическое применение этого принципа мы постоянно находим в работах одного из самых проницательных исследователей всех времен — Майкла Фарадея (1791—1867). Какова связь между электричеством и магнетизмом? Можно ли превратить одно в другое? Эти вопросы ставил перед собой Фарадей, начиная в 1822 г. свои экспериментальные исследования и вновь безуспешно возвращаясь к ним в 1825 г.

Эксперименты, поставленные после открытия Эрстеда, показали, что электрический ток сильно изменяет намагниченность магнита. В связи с этим Фарадей ожидал, что и магнит должен влиять на силу тока. В конце концов, в 1831 г. Фарадей сделал свое самое великое открытие — явление электромагнитной индукции. Наиболее наглядное проявление электромагнитной индукции было получено Фарадеем с помощью нехитрого прибора. На железное кольцо наматывались две отдельные спирали, из коих одна соединялась с батареей, а другая — с гальванометром. При замыкании первой цепи наблюдалось резкое отклонение стрелки гальванометра, при размыкании цепи наблюдалось отклонение противоположного знака. Этот важный опыт, всячески видоизменявшийся, позволил Фарадею «получить электричество из магнетизма» простейшим, сейчас хорошо известным способом: достаточно вводить магнит в спиральный проводник, соединенный с гальванометром, чтобы получить отклонение стрелки в одну сторону; при выводе магнита из спирали стрелка отклоняется в противоположную сторону.

В 1824 г. Араго заметил, что массивный медный корпус довольно сильно замедляет колебания стрелки компаса. Это наблюдение навело его на мысль поставить свой знаменитый опыт, в ходе которого обнаружилось отклонение магнитной стрелки при вращении медного диска, расположенного над или под нею. Придуманные для объяснения этого явления теории были столь искусственны, что для большинства ученых опыт Араго так и остался загадкой. После открытия явления электромагнитной индукции Фарадей подумал, что обнаруженное Араго явление может также объясняться появлением индуктивных токов в диске. Чтобы убедиться в этом, Фарадей стал вращать медный диск между полюсами магнита, подсоединив концы цепи гальванометра один к оси, а другой к краю диска. При вращении диска гальванометр указывал на наличие тока постоянного направления, величина которого менялась в зависимости от скорости вращения диска. Этим опытом Фарадей не только установил новое физическое явление, но и дал первый образец генератора электрического тока, отличного от батареи, т. е. дал этим первый толчок к развитию мощной современной электротехнической промышленности с ее всевозможнейшими практическими применениями.

Однако Фарадея не интересовали практические применения. Проведенный опыт позволял выявить качественные законы явления индукции. Из этого опыта Фарадей вывел правило, позволяющее определить направление тока в прямолинейном проводнике, движущемся перед полюсом магнита. Именно в связи с этим Фарадей впервые говорит о «магнитных кривых»: «Под магнитными кривыми я понимаю линии магнитных сил, хотя и искаженные соседством полюсов; эти линии вырисовываются железными опилками; к ним касательно располагались бы весьма маленькие магнитные стрелочки».

Фарадей видоизменял свои опыты самыми различными способами: применял и нитеобразные проводники, и дискообразные, вращал то магнит по отношению к электрическому контуру, то контур относительно магнита или земли. В результате он пришел к выводу, что электродвижущая сила индукции не зависит от природы проводника, и выдвинул следующую теорию относительно этого явления, в общих чертах оставшуюся неизменной с 1831 г. до наших дней: «Когда через провод проходит электрический ток, то этот провод во всех своих точках окружен магнитными кривыми, интенсивность которых убывает с расстоянием; мысленно можно уподобить их кольцам, расположенным в плоскостях, перпендикулярных проводу, или, вернее, протекающему в нем току. Хотя и отличные по форме, эти кривые являются совершенно аналогичными тем, которые существуют между двумя обращенными друг к другу разноименными полюсами. Когда второй провод, параллельный тому, который несет ток, приближают к последнему, то он проходит через магнитные кривые точно того же рода, которые он пересекал бы при своем перемещении в некотором направлении между противоположными полюсами».

Если нет перемещения индуцирующего проводника относительно проводника, в котором индуцируется ток, то ток не появляется, потому что тогда силовые линии не пересекаются. Когда индуцирующий проводник удаляется от второго проводника, силовые линии пересекаются в противоположном направлении и возникающий ток также идет в обратном направлении. Если оба проводника неподвижны, то при включении тока в индуцирующем проводнике происходит то же самое, как если бы магнитные кривые двигались «...с момента, когда они начинают развиваться, и вплоть до того момента, когда магнитная сила тока достигает наибольшего значения; они как бы распространяются в стороны от провода и, следовательно, оказываются по отношению к неподвижному, индуцируемому проводу в том же положении, как если бы он двигался в противоположном направлении поперек них или по направлению к несущему ток проводу».

В этих немногих словах заключаются очень важные и новые мысли: первое описание электромагнитного поля, мысль о зависимости интенсивности поля от числа магнитных кривых, распространение во времени магнитных возмущений.

Исследованиями в этом новом направлении, указанном Фарадеем, занялись многие физики: Джозеф Генри (1797—1878), который, как считают американцы, еще до Фарадея открыл явление индукции, обнаружил также явление самоиндукции, независимо от него открытое в 1833 г. Сальваторе даль Негро (1768—1839), а в следующем году — одновременно Уильям Дженкин и Антуан Массой (1806—1858). Особенно важными были работы Генри (1838 г.) по исследованию «токов высшего порядка», т. е. токов, индуцированных другими индуцированными токами. Это явление за год до того экспериментально установил Марианини. Явление это вовсе не так уж само собой очевидно, как может показаться сегодня. Исследования токов высшего порядка привели Генри в 1842 г. к выводу, что разряд лейденской банки состоит не из одного перехода электричества с одной обкладки на другую, а из целой серии быстро затухающих электрических колебаний. К этому же выводу в 1847 г. пришел Гельмгольц в своей статье «О сохранении силы».

В 1834 г. петербургский академик Эмиль Христианович Ленц (1804—1865) заметил, что правила Фарадея и Нобили, служащие для определения направления индуктивных токов, предусматривали слишком много различных случаев, тогда как, учитывая электродинамический закон Ампера, их можно было легко свести к одному-единственному правилу, применимому во всех случаях. Исходя из этого, Ленц сформулировал правило, носящее сейчас его имя.

Франц Нейман (1798—1895) положил в основу своей теории индукции, изложенной в двух замечательных работах 1845 и 1847 гг., закон Ленца, применимость закона Ома также к индуктивным токам и выдвинутый им новый принцип, согласно которому индукция, возникающая в определенный момент времени, пропорциональна скорости, с которой передвигается проводник.

На вопрос, поставленный Ампером, ответ был найден Гауссом, но не был им опубликован. Взаимодействие двух электрических зарядов зависит не только от расстояния между ними, но и от скорости, с которой они перемещаются относительно друг друга. Закон же Кулона действителен только для двух неподвижных зарядов. В 1846 г. Вильгельм Вебер, развивая идею своего учителя, вывел формулу, заменяющую формулу Кулона в случае двух движущихся зарядов. Из этой формулы следовало, что взаимодействие двух элементов тока подчиняется закону Ампера, и выводилась вся теория индукции, целиком согласующаяся с теорией Неймана.

Более оригинальной представлялась теория Гельмгольца, изложенная в уже несколько раз упоминавшейся нами работе «О сохранении силы» (1847 г.) и дополненная затем Томсоном. Гельмгольц показал, что индукция электрических токов может быть математически выведена из электромагнитных явлений Эрстеда и электродинамических явлений Ампера, если только принять принцип сохранения энергии.

Но законы Неймана, Вебера, Гельмгольца и аналогичные исследования Абриа и Генри, казалось, заключали в себе теоретические предпосылки, не целиком основывающиеся на опыте, поэтому Риккардо Феличи (1819— 1902) поставил перед собой задачу выявить законы электромагнитной индукции, опираясь «только на данные опыта, с помощью метода, которым пользовался Ампер при выведении формулы взаимодействия элементов тока».

Феличи проводил тщательные экспериментальные и теоретические исследования в этом направлении непрерывно с 1851 по 1856 г.; о результатах этих исследований он по ходу работ время от времени делал сообщения, и, наконец, изложил их в большой работе, озаглавленной «Sulla teoria matematica dell'induzione elettrodinamica» («О математической теории электромагнитной индукции»), опубликованной в 1854 и 1857 гг. В этой работе теоретически рассмотрены явления индукции, наблюдающиеся при размыкании первичной цепи, при взаимном передвижении индуцируемого и индуцирующего токов, при движении проводника в магнитном поле и при взаимном» движении двух частей одного и того же электрического контура. Теория Феличи была предметом оживленных споров на протяжении всего XIX века, но в конце концов стало ясно, особенно после разъясняющих работ Максвелла, что она эквивалентна теориям Неймана и Вебера, но имеет лишь несколько более эмпирическое обоснование.