

током не будет испытывать воздействия какой-либо силы.

501.] Необходимо особенно иметь в виду, что механическая сила, которая перемещает проводник с током наперерез линиям магнитной силы, действует не на электрический ток, но на проводник, который его несет. Если проводник представляет собой вращающийся диск или жидкость, он будет перемещаться, повинаясь этой силе, и это движение может сопровождаться или не сопровождаться изменением положения электрического тока, который он несет. [Но если ток сам по себе свободен избрать любой путь через неподвижный плотный проводник или сеть проводов, тогда, если постоянная магнитная сила действует на систему, путь тока через проводники не меняется устойчивым образом. После того как известные преходящие явления, называемые токами индукции, прекратились, распределение тока окажется таким же, как будто бы не было никакой магнитной силы.] *)

Единственная сила, которая действует на электрические токи, это—электродвижущая сила, которую необходимо отличать от механической силы, являющейся предметом настоящей главы.

*) {Холл (Hall) открыл (Phil. Mag., т. IX, стр. 225; т. X, стр. 301, 1880), что постоянное магнитное поле слегка изменяет распределение токов в большинстве проводников, так что утверждение, поставленное в тексте в скобках, должно рассматриваться лишь как приблизительно верное.}



ГЛАВА III

ОБ ИНДУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ

528.] Открытие Эрстедом магнитного действия электрического тока привело путем непосредственных умозаключений к открытию намагничения при помощи электрических токов и к установлению механического взаимодействия между электрическими токами. Однако только в 1831 г. Фарадей, который в течение длительного времени пытался получить электрические токи при помощи магнитных или электрических воздействий, открыл условия магнитно-электрической индукции. Примененный Фарадеем в его исследованиях метод состоял в постоянном обращении к эксперименту в качестве средства проверки правильности его идей и к постоянному развитию идей под прямым влиянием эксперимента. В опубликованных им исследованиях мы находим, что эти идеи выражены языком, наилучшим образом приспособленным для целей рождающейся науки, так как этот язык весьма отличается от стиля физиков, привыкших к пользованию обычными математическими формами мышления.

Экспериментальные исследования, которыми Ампер установил законы механического взаимодействия между электрическими токами, являются одним из наиболее блестящих достижений науки.

Все в совокупности, и теория и эксперимент, как будто появилось в полной зрелости и в полном вооружении из головы «Ньютона электричества». Эти иссле-

дования законсны по форме, идеальны по точности и резюмированы в формуле, из которой могут быть выведены все явления и которая навсегда должна остаться фундаментальной формулой электродинамики.

Метод Ампера, однако, хотя и изложен в индуктивной форме, не позволяет нам проследить процесс образования и развития идей, которыми он руководствовался. Мы с трудом можем поверить, что Ампер в действительности открыл закон взаимодействия при посредстве описываемых им экспериментов. Мы вынуждены подозревать, в чем, впрочем, признается сам Ампер*), что закон открыт им при помощи некоего процесса, который он нам не показывает, и что когда была построена законченная теория, он удалил все следы лесов, при помощи которых здание теории было возведено.

Фарадей, напротив, показывает нам свои как неудачные, так и удачные эксперименты, как свои несозревшие идеи, так и идеи разработанные, и читатель, сколько бы ни был ниже его по своей способности индуктивного мышления, чувствует скорей симпатию, чем восхищение, и приходит к искушению поверить в то, что при случае он также сделал бы эти открытия. Поэтому каждому изучающему следовало бы читать исследования Ампера как блестящий образец научного стиля при изложении открытия, но ему следовало бы также изучать Фарадея для воспитания научного духа на той борьбе противоречий, которая возникает между новыми фактами, излагаемыми Фарадеем, и идеями, рождающимися в его собственном мозгу⁽²⁾.

Возможно, что для науки было большим преимуществом то обстоятельство, что Фарадей не был профессиональным математиком, хотя и был хорошо знаком с основными идеями пространства, времени и силы. У него не было соблазна входить во многие интересные

изыскания в области чистой математики, которых потребовали бы его открытия, если бы они были представлены в математической форме, и он ни при одном из своих открытий не чувствовал потребности втиснуть полученные результаты в приемлемую для математических требований его времени форму или выразить их в такой форме, которую математики могли бы оспаривать. Таким образом, он имел возможность спокойно делать свою собственную работу, координировать свои идеи с полученными им фактами и высказывать их обычным, не техническим, языком.

Я предпринял работу над этим трактатом главным образом в надежде сделать эти идеи основой математической теории.

529.] Мы привыкли рассматривать вселенную как состоящую из частей, и математики обычно начинают с рассмотрения отдельной частицы, затем устанавливают ее отношение к другой частице и т. д. Это по общему мнению считалось наиболее естественным методом. Однако, для того чтобы создать себе представление о частице, требуется процесс абстракции, так как все наши восприятия относятся к более или менее значительным телам, так что идея *целого*, имеющаяся в нашем сознании в какой-нибудь данный момент, возможно, является настолько же первичной, как и представление об индивидуальной вещи. Поэтому может существовать и математический метод, в котором мы переходим от целого к частям, вместо того чтобы идти от частей к целому.

Так, например, в своей первой книге Эвклид рассматривает линию как след точки, поверхность — как образованную линией и объем — как производное поверхности. Но он также определяет поверхность как границу объема, линию — как край поверхности и точку — как конец линии.

Подобным же способом мы можем рассматривать потенциал материальной системы как функцию, найденную известным процессом интегрирования с учетом масс тел, находящихся в поле, или мы можем пред-

*) A m p è r e, Théorie des phénomènes Electrodynamiques: стр. 9.

положить, что сами эти массы не имеют другого математического значения, чем объемные интегралы от $\frac{1}{4\pi} \nabla^2 \Psi$, где Ψ есть потенциал.

В электрических исследованиях мы можем применить формулы, в которых фигурируют такие величины, как расстояния между телами, их заряды, или токи в этих телах, или мы можем использовать формулы, в которые входят другие величины, непрерывные во всем пространстве.

Математические операции, применяемые в первом методе,—интегрирование вдоль линий, по поверхностям и по ограниченным объемам пространства, а используемые во втором методе—дифференциальные уравнения в частных производных и интегрирование по всему пространству.

Метод Фарадея, повидимому, тесно связан со вторым из этих методов. Он никогда не рассматривает тела существующими так, что между ними нет ничего кроме расстояния, и действующими одно на другое лишь в соответствии с некоторой функцией этого расстояния. Он рассматривает все пространство как поле силы, причем линии силы, вообще говоря, искривлены так, что линии, относящиеся к какому-либо телу, исходят из него во все стороны, а их направления изменяются вследствие присутствия других тел. Он даже говорит *) о силовых линиях, относящихся к телу, как в некотором смысле о части самого этого тела, так что нельзя сказать, что в своем действии на отдельные тела тело действует там, где его самого нет.

Это, однако, не является доминирующей идеей у Фарадея. Я думаю, что он скорее хочет сказать, что поле всюду заполнено силовыми линиями, расположение которых зависит от расположения тел в поле, и что механическое или электрическое действие на каждое тело определяется силовыми линиями, которые его окружают.

*) Exp. Res., т. II, стр. 293; т. III, стр. 447 (англ. изд.).

Явления магнитно-электрической индукции *)

530.] 1. *Индукция при изменении первичного тока.* Пусть имеются две проводящие цепи—первичная и вторичная. Первая цепь связана с вольтовой батареей, дающей первичный ток, который может оставаться постоянным, прерываться или идти в обратном направлении. Во вторичную цепь включен гальванометр, который указывает появление любых могущих образоваться в этой цепи токов. Этот гальванометр устанавливается на таком расстоянии от всех частей первичной цепи, что первичный ток не может оказать какого-либо ощутительного прямого влияния на его показания.

Пусть часть первичной цепи состоит из прямого провода, а часть вторичной цепи также из прямого провода, расположенного близко и параллельно к первому, все же остальные части цепей находятся на значительном расстоянии друг от друга.

Установлено, что в момент посылки тока через прямой провод первичной цепи гальванометр вторичной цепи указывает на наличие тока во вторичном прямом проводе *обратного* направления. Этот ток называется индуктированным током. Если первичный ток поддерживается постоянным, индуктированный ток быстро исчезает, и, повидимому, первичный ток не производит действия на вторичную цепь. Если теперь прервать вторичный ток, то наблюдается вторичный ток, проходящий *в том же* направлении, что и первичный ток. Каждое изменение первичного тока производит электродвижущую силу во вторичной цепи. Когда первичный ток увеличивается, электродвижущая сила действует в направлении, обратном току. Когда ток уменьшается, электродвижущая сила действует в том же направлении, что и направление первичного тока. Когда первичный ток постоянен, электродвижущей силы нет.

*) См. «Experimental Res.» Фарадея, серии I и II (см. русск. изд.).

Эти эффекты индукции увеличиваются при сближении обоих проводов. Они также усиливаются при образовании из проводов двух круговых или спиральных катушек, расположенных близко друг к другу и еще более усиливаются при помещении железного сердечника или пучка железных проволок внутрь катушек.

2. *Индукция при перемещении первичной цепи.* Мы видели, что в том случае, когда первичный ток остается постоянным и цепь неподвижна, вторичный ток быстро исчезает. Предположим теперь, что первичный ток остается постоянным, но первичный прямой провод приближается к вторичному прямому проводу. При движении первичного провода будет наблюдаться вторичный ток, направленный в обратном направлении по сравнению с направлением первичного тока.

Если первичная цепь удаляется от вторичной, то будет наблюдаться вторичный ток в том же направлении, что и первичный.

3. *Индукция при движении вторичной цепи.* Если двигать вторичную цепь, то вторичный ток будет иметь направление, обратное первичному, в том случае, когда провод вторичной цепи приближается к проводу первичной цепи, и то же самое направление, когда он удаляется от него.

Во всех случаях направление вторичного тока таково, что механические действия между двумя проводниками противоположны направлению движения, будучи отталкиванием, когда провода сближаются, и притяжением, когда они удаляются друг от друга. Этот весьма важный факт был установлен Ленцем*).

4. *Индукция при относительном движении магнита и вторичной цепи.* Если вместо первичного контура мы возьмем магнит, торцовая сторона которого совпадает с контуром и сила которого численно равна силе тока контура, причем его южная сторона соответ-

*) См. Ленц, Pogg. Ann., XXXI, стр. 483 (1834); Э. Х. Ленц, Избранные труды. Серия «Классики естествознания», стр. 147—157. (Ред.)

ствует положительной стороне тока, то явления, производимые относительным движением этого магнита и вторичного тока, совершенно одинаковы с теми явлениями, которые наблюдаются в случае наличия первичного тока.

531.] Совокупность этих явлений может быть суммирована в одном законе. Когда число линий магнитной индукции, пронизывающих вторичный контур в положительном направлении, изменяется, то в контуре возникает электродвижущая сила, которая измеряется скоростью убывания потока магнитной индукции, пронизывающего контур.

532.] Так, например, пусть рельсы железной дороги изолированы от земли, но в одном своем конце соединены через гальванометр и пусть ток замыкается колесами и осью железнодорожного вагона на расстоянии x от конца. Если пренебречь высотой оси над уровнем рельсов, то индукция через этот вторичный контур сводится к вертикальной слагающей земной магнитной силы, которая в северных широтах направлена сверху вниз. Отсюда, если b есть ширина колеи железной дороги, горизонтальная площадь контура тока равна bx , и поверхностный интеграл магнитной индукции через нее равен Zbx , где Z — вертикальная слагающая магнитной силы земли. Поскольку Z направлена вниз, нижнюю сторону цепи следует считать положительной, и положительное направление в цепи будет север — восток — юг — запад, т. е. направление кажущегося дневного движения солнца.

Пусть теперь железнодорожный вагон приведен в движение, тогда x будет изменяться, а в цепи возникает электродвижущая сила, величина которой равна $-Zb \frac{dx}{dt}$.

Если x увеличивается, т. е. если вагон удаляется от конечного пункта, то электродвижущая сила возникает в отрицательном направлении или в направлении север — запад — юг — восток. Таким образом, направление этой силы через ось будет справа налево.

Если бы x уменьшался, абсолютное направление силы было бы обратным, но так как направление движения вагона также будет происходить в обратном направлении, то электродвижущая сила на оси все-таки будет направлена справа налево (предполагая, что наблюдатель, находящийся в вагоне, всегда находится лицом по направлению движения). В южных широтах, где южный конец намагниченной стрелки направлен вниз, электродвижущая сила в движущемся теле направлена слева направо.

Отсюда мы получаем следующее правило для определения направления электродвижущей силы в проводе, движущемся в магнитном поле, перпендикулярно к нему.

Вообразите, что ваша голова и ноги совпадают с концами компасной стрелки, которые соответственно направлены на север и на юг, и обратите ваше лицо по направлению движения, тогда электродвижущая сила, возникающая в результате движения, будет направлена слева направо.

533.] Так как знание связи этих направлений весьма важно, то попытаемся использовать еще одну иллюстрацию. Предположим, что вокруг земли по экватору положен металлический пояс и вдоль Гринвичского меридиана проложен металлический провод от экватора к северному полюсу.

Пусть будет построена большая квадрантная металлическая дуга, один конец которой вращается около северного полюса, в то время как другой движется по экватору, скользя по большому металлическому поясу земли и следуя за солнцем в его дневном движении. Тогда вдоль движущегося квадранта возникает электродвижущая сила, действующая от полюса к экватору.

Электродвижущая сила будет той же, если мы предположим, что земля неподвижна и квадрант движется с востока на запад, или если мы предположим, что квадрант находится в покое, а земля вращается с запада на восток. Если мы предположим, что вращается

земля, то электродвижущая сила будет той же, какова бы ни была форма части неподвижного в пространстве контура, у которого один конец касается одного из полюсов, а другой — экватора. Ток в этой части цепи будет направлен от полюса к экватору.

Другая часть цепи, которая неподвижно связана с землей, может также иметь любую форму и может быть внутри или вне земли. В этой части направление тока будет от экватора к любому из полюсов⁽³⁾.

534.] Величина электродвижущей силы магнитно-электрической индукции совершенно не зависит от природы вещества проводника, в котором она действует, и также от природы проводника, несущего индуктирующий ток.

Для того чтобы показать это, Фарадей*) сделал проводник из двух проволок различных металлов, изолированных одна от другой шелковой обмоткой, переплетенных вместе и спаянных друг с другом на одном конце. Другие концы проволок были соединены с гальванометром. Таким путем проволоки были расположены одинаковым образом по отношению к первичной цепи, и если бы электродвижущая сила была сильнее в одной из проволок, это произвело бы ток, который был бы указан гальванометром. Однако он установил, что такая комбинация может быть подвержена действию самых мощных индукционных электродвижущих сил, без того чтобы на гальванометр было оказано какое-либо влияние. Он также нашел, что

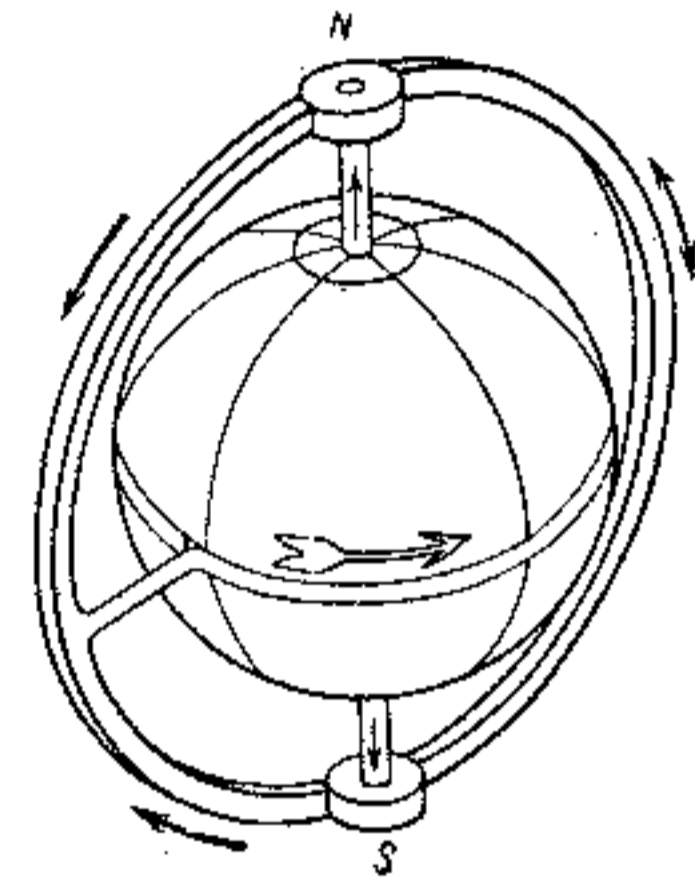


Рис. 8.

*) Exp Res., (195) (см. русск изд.).

если обе части сложного проводника состояли из двух металлов или из металла и электролита, гальванометр также не отмечал тока*). Следовательно, электродвижущая сила в любом проводнике зависит только от формы и движения этого проводника, а также от силы, формы и движения электрических токов в поле.

535.] Другая особенность электродвижущей силы состоит в том, что она сама по себе не производит механического движения тела, а только вызывает в нем электрический ток.

Если она в действительности производит ток в теле, то появляется механическое действие, связанное с этим

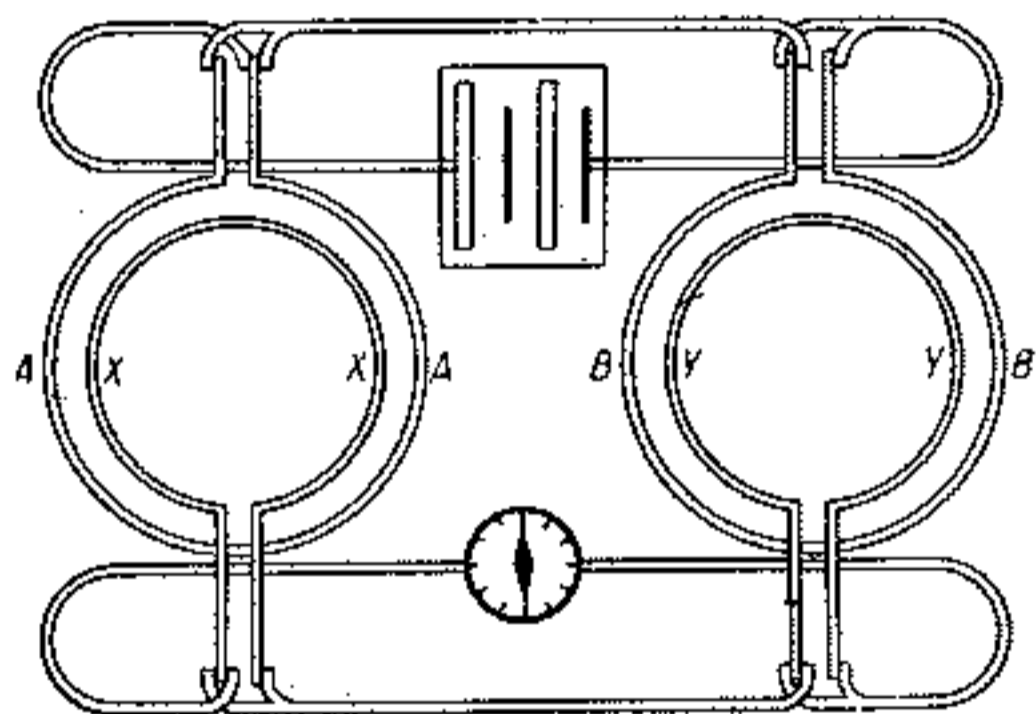


Рис. 9.

током, если же мы воспрепятствуем образованию тока, то не будет механического действия на самое тело. Если тело наэлектризовано, электродвижущая сила будет двигать его, как мы уже описали в разделе «Электростатика».

536.] Экспериментальное исследование законов индукции электрических токов в неподвижных цепях может быть проведено со значительной точностью при помощи методов, в которых электродвижущая

*) Exp. Res. (200) (см. русск. изд.).

сила, а следовательно, ток в цепи гальванометра становится равным нулю.

Так, например, если хотят показать, что индукция катушки *A* на катушку *X* равна индукции катушки *B* на катушку *Y*, помещают первую пару катушек *A* и *X* на достаточном расстоянии от второй пары *B* и *Y*. Затем соединяют *A* и *B* с вольтовой батареей таким образом, что тот же самый первичный ток идет через *A* в положительном направлении и затем через *B* в отрицательном направлении. Далее соединяют *X* и *Y* с гальванометром так, что вторичный ток, если он существует, должен течь последовательно в том же самом направлении через *X* и *Y*.

При этом, если индукция *A* на *X* равна индукции *B* на *Y*, гальванометр не укажет тока индукции, когда цепь батареи замыкается или размыкается.

Точность этого метода повышается вместе с силой первичного тока и чувствительностью гальванометра к мгновенным токам, и опыты производятся значительно легче, чем опыты, связанные с электромагнитными притяжениями, при которых сам проводник должен быть очень тонко подвешен.

Профессором Феличи из Пизы*) описан весьма поучительный ряд хорошо разработанных опытов этого рода.

Я только вкратце укажу некоторые из законов, которые могут быть доказаны этим способом.

1) Электродвижущая сила индукции одной цепи на другую независима от площади сечения проводников и от материала, из которого они сделаны**).

Действительно, мы можем в опыте заменить каждую из цепей другой, отличающейся сечением и материалом, но той же самой формы, без изменения результата.

*) Felici, Annales de Chimie, XXXIV, стр. 64, 1852 и Nuovo Cimento, IX, стр. 345, 1859.

***) {Это утверждение не обязательно будет строго правильным, если одно или большее число взятых веществ магнитны, так как в этом случае распределение магнитных силовых линий нарушается индуктированным в проволоках магнетизмом.}

(2) Индукция цепи A на цепь X равна индукции цепи X на A .

Действительно, если мы поместим A в цепь гальванометра и X в батарейную цепь, равновесие электродвижущей силы не будет нарушено.

(3) Индукция пропорциональна индуктирующему току.

В самом деле, если мы удостоверились, что индукция A на X равна индукции B на Y , а также индукции C на Z , мы можем пропустить батарейный ток сначала через A , а затем распределить его в любом соотношении между B и C . Если мы теперь последовательно присоединим к гальванометру цепь X в обратном направлении, цепи Y и Z в прямом, то электродвижущая сила в X будет уравнивать сумму электродвижущих сил в Y и Z .

(4) В парах цепей, образующих геометрически подобные системы, индукция пропорциональна их линейным размерам.

В самом деле, если три вышеупомянутые пары цепей подобны по форме, но линейные размеры первой пары равны сумме соответствующих линейных размеров второй и третьей пар, тогда, если A , B и C соединены последовательно с батареей и если X —в обратном направлении, а Y и Z —в прямом последовательно соединены с гальванометром, то будет наблюдаться равновесие.

(5) Электродвижущая сила, производимая в катушке, состоящей из n витков, током в катушке из m витков, пропорциональна произведению mn .

537.] Для рассмотренных выше опытов мы указывали, что гальванометр должен быть как можно более чувствительным и его стрелка как можно более легкой, с тем чтобы давать заметные показания в случае кратковременных токов весьма малой силы. Опыты по индукции, производимой движением, требуют, чтобы стрелка имела несколько больший период колебания, с тем чтобы имелось время произвести несколько движений проводников, пока стрелка недалеко от своего положения

равновесия. В рассмотренных выше опытах электродвижущие силы в цепи гальванометра были в равновесии в течение всего времени, так что через катушку гальванометра не проходило никакого тока. В опытах, которые мы сейчас опишем, электродвижущие силы сначала действуют в одном направлении, а затем—в другом так, что они порождают в гальванометре один за другим два тока в противоположных направлениях, и мы должны показать, что импульсы, действующие на стрелку гальванометра при прохождении этих следующих друг за другом токов, в известных случаях равны и противоположны.

Теория применения гальванометра к измерению кратковременных токов будет более подробно рассмотрена в параграфе 748 *). Сейчас для наших целей достаточно заметить, что, пока стрелка гальванометра близка к своему положению равновесия, отклоняющая сила тока пропорциональна самому току, и если полное время действия тока невелико по сравнению с периодом колебания стрелки, то конечная скорость магнита будет пропорциональна общему количеству электричества, перенесенному током. Отсюда, если два тока проходят, быстро следуя друг за другом и перенося равные количества электричества в противоположных направлениях, стрелка не приобретает в конечном счете какой-либо скорости.

Таким образом, для того чтобы показать, что индуктируемые токи во вторичной цепи, возникающие вследствие замыкания и размыкания первичной цепи, равны по общему количеству перенесенного электричества, но противоположны по направлению, мы можем так устроить соединение первичной цепи с батареей, чтобы, нажимая на ключ, получать ток в первичной цепи, а снимая палец с контакта, прерывать его по желанию. Если ключ нажимается на некоторое время, гальванометр во вторичной цепи показывает в момент образования контакта мгновенный ток, имеющий направ-

*) Этот параграф не вошел в настоящее издание. (Ред.)

ление, обратное первичному току. Если контакт поддерживается, индуктированный ток длится короткое время и быстро исчезает. Если мы теперь прервем контакт, то через вторичную цепь пройдет другой мгновенный ток в противоположном направлении и стрелка гальванометра получит импульс в противоположном направлении.

Но если мы осуществим контакт только на одно мгновение и затем прервем его, два индуктированных тока пройдут через гальванометр в столь быстрой последовательности, что стрелка его, будучи подвергнута воздействию первого тока, не имеет достаточно времени, чтобы передвинуться на заметное расстояние от своего положения равновесия, до того как она останавливается вторым током. Вследствие точного равенства перенесенных этими мгновенными токами количеств электричества стрелка остается неподвижной.

Если тщательно наблюдать за стрелкой, то можно заметить, что она внезапно вздрагивает, переходя от одного положения покоя к другому, очень близко расположенному от первого.

Это доказывает, что количества электричества, перенесенное током, когда контакт прерывается, в точности равно и противоположно количеству электричества индуктированного тока, образующегося при замыкании контакта.

538.] Другим применением этого метода является следующее, указанное Феличи во второй серии его «Исследований».

Всегда можно найти много различных положений вторичной катушки B , таких, что замыкание или размыкание контакта в первичной катушке A не дает индуктированных токов в B . В таких случаях говорят, что положения двух катушек являются *сопряженными*.

Пусть B_1 и B_2 будут двумя из этих положений. Если катушка B внезапно передвигается из положения B_1 в положение B_2 , то алгебраическая сумма мгновенных токов в катушке B в точности равна нулю, так что стрелка гальванометра остается в покое, когда движе-

ние B закончено. Это остается правильным независимо от того, каким способом катушка B перемещается из B_1 в B_2 , и также независимо от того, остается ли ток в первичной катушке A постоянным или же он во время движения изменяет свою величину.

Далее пусть B' будет какое-либо другое положение B , не сопряженное с A , так что замыкание или размыкание контакта в A дает индуктированный ток, когда B находится в положении B' .

Установим контакт тогда, когда B находится в сопряженном положении B_1 , в этом случае ток индукции отсутствует. Передвинем B в положение B' , тогда будет наблюдаться ток индукции, производимый движением. Но если B быстро передвинуть в положение B' и затем разомкнуть первичную цепь, то индуктированный ток, возникающий вследствие размыкания контакта, в точности аннулирует эффект тока индукции, обусловленного движением, так что стрелка гальванометра останется в покое. Отсюда ток, возникающий в результате движения от сопряженного положения в любое другое положение, равен и противоположен току, обусловленному размыканием контакта в последнем положении. Так как эффект замыкания контакта равен и противоположен эффекту размыкания, отсюда следует, что эффект замыкания контакта, когда катушка B находится в любом положении B' , эквивалентен эффекту перенесения катушки из любого сопряженного положения B_1 в положение B' , в то время как ток протекает через A .

Если перемена относительного положения катушек производится при помощи движения первичной цепи вместо движения вторичной, то результат будет тем же самым.

539.] Из этих опытов следует, что полный ток индукции в B_1 при одновременном движении катушки из положения A_1 в положение A_2 и катушки B из положения B_1 в положение B_2 и при изменении тока в A от γ_1 до γ_2 зависит только от первоначального состояния A_1, B_1, γ_1 и конечного состояния A_2, B_2, γ_2 , а вовсе

не от характера промежуточных состояний, через которые эта система может проходить.

Отсюда величина полного тока индукции должна иметь вид

$$F(A_2, B_2, \gamma_2) - F(A_1, B_1, \gamma_1),$$

где F является функцией A , B и γ .

Что касается формы этой функции, то согласно параграфу 536 мы знаем, что в тех случаях, когда нет движения, а следовательно, $A_1 = A_2$ и $B_1 = B_2$, ток индукции пропорционален первичному току. Поэтому γ входит только как множитель, в то время как другим множителем является функция формы и положения цепей A и B .

Мы также знаем, что величина этой функции зависит от относительных, но не от абсолютных положений A и B , так что можно выразить ее как функцию расстояний различных элементов, из которых составлены цепи, и углов, которые эти элементы образуют между собой.

Пусть M будет этой функцией, тогда полный ток индукции может быть записан как

$$C \{M_1 \gamma_1 - M_2 \gamma_2\},$$

где C есть проводимость вторичной цепи, M_1 и γ_1 являются начальными, а M_2 и γ_2 конечными значениями M и γ .

Эти опыты, следовательно, показывают, что полный ток индукции зависит от изменения некоторого определенного количества $M\gamma$ и что это изменение может произойти или вследствие изменения величины первичного тока γ или вследствие движения первичной или вторичной цепи, которое изменяет величину M .

540.] Концепция существования такой величины, от изменений которой, а не от ее абсолютной величины зависит ток индукции, встречается у Фарадея в первой серии его «Исследований» *).

Он наблюдал, что вторичная цепь, находясь в покое в электромагнитном поле неизменного напряжения,

*) Exp. Res., серия I, (60) (см. русск. изд.).

не показывает наличия какого-нибудь электрического эффекта, в то время как, если то же самое состояние поля было бы достигнуто внезапно, возникает ток. Если же первичная цепь удаляется из поля или устраняются магнитные силы, образуется ток противоположного направления.

По этой причине он приписал вторичной цепи, находящейся в электромагнитном поле, «особое электрическое состояние материи», которому он дал название *электротонического состояния*. Затем он нашел, что он может расстаться с этой идеей при помощи соображений, основанных на линиях магнитной силы *), но даже в его последних исследованиях **) он говорит: «Неоднократно в моем уме настойчиво возникала идея *электротонического состояния* ***).

Вся история развития этой идеи в уме Фарадея, как она показана в опубликованных им «Исследованиях», заслуживает изучения. В результате целого ряда опытов, которые были основаны на тщательном размышлении, но без помощи математических вычислений, он пришел к идее, что существует нечто, что нам ныне известно как математическая величина и что может быть даже названо основной величиной в теории электромагнетизма. Но так как он пришел к этой концепции чисто экспериментальным путем, он приписал ей физическое существование и предположил, что это особое состояние материи, хотя был готов отбросить эту теорию, как только он смог бы объяснить явления в любой более привычной нам форме.

Другие исследователи значительно позже Фарадея пришли к той же самой идее чисто математическим путем, но, насколько я знаю, ни один из них не узнал в уточненной математической идее потенциала двух контуров фарадееву смелую гипотезу электротонического состояния. Поэтому те, кто изучал этот предмет путем, намеченным выдающимися исследователями, впервые

*) Exp. Res., серия II, (242) (см. русск. изд.).

**) Там же, (3269).

***) Там же, (60, 1114, 1661, 1729, 1733) (см. русск. изд.).

выразившими законы этих явлений в математической форме, иногда затруднялись оценить научную точность той формулировки законов, которую Фарадей в своих двух первых сериях «Исследований» дал со столь удивительной полнотой.

Научное значение фарадесвой концепции электро-топического состояния состоит в том, что она направила мысль на признание существования некоторой величины, от изменений которой зависят наблюдаемые явления. Эта концепция недостаточна для объяснения явлений, если ее не развить в значительно большей степени, чем это было сделано Фарадеем. К этому вопросу мы снова вернемся в параграфе 584.

541.] В руках Фарадея значительно более мощным был метод, в котором он использует те линии магнитной силы, которые он всегда представлял себе, когда рассматривал магнитные или электрические токи и изображение которых при помощи железных опилок он справедливо считал *) наиболее ценной помощью экспериментатору.

Фарадей рассматривал эти линии, как выражающие не только своим направлением направление магнитной силы, но также числом и степенью своей концентрации—напряженность этой силы. В своих последних «Исследованиях» **) он показывает, как представлять себе единичные силовые линии. В различных частях этого трактата я объяснил, каково соотношение между свойствами, которые Фарадей приписывал силовым линиям; и математическими условиями электрических и магнитных сил и каким образом представление Фарадея о единичных силовых линиях и о количестве линий может быть в известных пределах математически точным. См. параграфы 82, 404, 490.

В первых сериях своих «Исследований» ***) Фарадей ясно показывает, как направление тока в проводящем контуре, часть которого может двигаться, зависит от

того способа, каким движущаяся часть пересекает магнитные силовые линии.

Во второй серии *) он показывает, как явления, производимые изменением силы тока или магнита, могут быть объяснены путем предположения, что система силовых линий расширяется или стягивается по направлению к проволоке или магниту в зависимости от того, увеличивается их сила или уменьшается. Я не знаю, с какой степенью ясности он уже придерживался доктрины, которая в дальнейшем была столь отчетливо изложена им **), именно, что суммарное действие на движущийся проводник, когда он перерезает силовые линии, зависит от площади или сечения этих силовых линий. Это, однако, не является чем-то новым, если принять во внимание исследования, изложенные во второй серии ***).

Концепция, которую Фарадей имел в отношении непрерывности силовых линий, устраняет возможность их внезапного появления в месте, в котором их до этого момента совершенно не было. Если, следовательно, число линий, пронизывающих проводящий контур, изменяется, то это может произойти только вследствие движения контура через силовые линии или в другом случае вследствие движения силовых линий через контур. И в том и в другом случае в цепи образуется ток.

Понятие числа силовых линий, проходящих через контур в любой момент, математически эквивалентно более ранней концепции Фарадея об электро-топическом состоянии этого контура; оно представлено величиной $M\gamma$.

Только после того как определение электродвижущей силы (параграфы 69, 274) и способы ее измерения были сделаны более точными, мы можем полностью сформулировать истинный закон магнитно-электрической индукции, который гласит:

*) Exp. Res., (238) (см. русск. изд.).

***) Там же, (3082), (3087), (3113).

***) Там же, (217) и далее (см. русск. изд.).

*) Exp. Res. (3234).

***) Там же, (3122).

***) Там же, (114) (см. русск. изд.).

Полная электродвижущая сила, действующая вдоль контура в какой-нибудь момент, измеряется быстротой уменьшения числа магнитных силовых линий, пронизывающих его.

Будучи интегрировано по времени, это утверждение приобретает следующую форму:

Интеграл по времени от полной электродвижущей силы, действующей вдоль некоторого контура, есть величина постоянная, вместе с числом магнитных силовых линий, пронизывающих контур.

Вместо того чтобы говорить о числе магнитных силовых линий, мы можем говорить о магнитной индукции сквозь контур цепи или о поверхностном интеграле магнитной индукции, распространенным по всей поверхности, ограниченной контуром.

Мы в дальнейшем снова возвратимся к этому методу Фарадея. Тем временем мы должны перечислить теории индукции, основанные на других соображениях.

Закон Ленца

542.] В 1834 г. Ленц *) сформулировал следующее замечательное соотношение между явлениями механического взаимодействия электрических токов, определенными формулой Ампера и индукцией электрических токов вследствие относительного движения проводников. Более ранняя попытка установления такого соотношения была изложена Ричи (Ritchie) в журнале «Philosophical Magazine» за январь того же года, но направление индуктированного тока было во всяком случае им установлено неправильно. Закон Ленца гласит:

Если постоянный ток течет по первичной цепи А и если вследствие движения А или движения вторичной цепи В во вторичной цепи В индуктируется ток, то направление этого индуктированного тока будет таким, что по своему электромагнитному воздействию

*) Pogg. Ann., XXXI, стр. 483 (1834). См. сноску на стр. 386. (Ред.)

на А он имеет тенденцию противодействовать относительному движению цепей.

На этом законе Ф. Е. Нейман *) основал свою математическую теорию индукции, в которой он установил математические законы индуктированных токов, возникающих в результате движения первичного или вторичного проводника. Он показал, что величина M , которую мы назвали потенциалом одной цепи на другую, является тем же самым, что и электромагнитный потенциал одной цепи по отношению к другой, который мы уже исследовали в связи с формулой Ампера **). Таким образом, Нейман распространил на индукцию токов тот математический метод, который Ампер применил к их механическому взаимодействию.

543.] Вскоре после этого Гельмгольц в его «Мемуаре о сохранении силы» ***) и В. Томсон ****) в более поздних исследованиях, но независимо от Гельмгольца, сделали шаг, имеющий еще большую научную важность, а именно: они показали, что открытая Фарадеем индукция электрических токов могла быть математически выведена из электромагнитных действий, открытых Эрстедом и Ампером путем применения принципа сохранения энергии.

Гельмгольц берет случай проводящей цепи, обладающей сопротивлением R , в которой действует электродвижущая сила A от вольтовой батареи или термоэлектрической пары. Ток в цепи в какой-нибудь момент равен I . Он предполагает, что магнит, находящийся поблизости от цепи, движется и что его потенциал по отношению к проводнику равен V , так что

*) F. E. Neumann, Berlin. Akad., 1845 и 1847.

***) Предыдущая глава, в которой изложен метод Ампера в настоящем издании опущена. (Ред.)

****) Зачитано на заседании Берлинского физического общества 23 июля 1847 г.; см. сноску на стр. 80

*****) Trans. Brit. Ass., 1848, и Phil. Mag., декабрь 1851 г.; см. также его работу «Transient Electric Currents», Phil. Mag., июнь 1853 г.

в течение некоторого малого интервала времени dt энергия, сообщаемая магниту электромагнитным действием, равна $I \frac{dV}{dt} dt$. По закону Джоуля (параграф 242) работа, затраченная на выделение тепла в цепи, равна $I^2 R dt$, а работа, выполненная электродвижущей силой A , на поддержание тока I в течение времени dt , равна $AI dt$.

Отсюда, поскольку вся выполненная работа должна равняться всей израсходованной:

$$AI dt = I^2 R dt + I \frac{dV}{dt} dt,$$

откуда мы находим силу тока

$$I = \frac{A - \frac{dV}{dt}}{R}.$$

Поскольку величина A произвольна, пусть $A = 0$, и тогда

$$I = -\frac{1}{R} \frac{dV}{dt}.$$

Иначе говоря, в цепи будет ток, порождаемый движением магнита, равный току, производимому электродвижущей силой $-\frac{dV}{dt}$.

Полный индуктированный ток за время движения магнита от места, где его потенциал равен V_1 , к месту, где его потенциал равен V_2 , будет:

$$\int I dt = -\frac{1}{R} \int \frac{dV}{dt} dt = \frac{1}{R} (V_1 - V_2),$$

т. е. полный ток не зависит от скорости или от пути магнита, а зависит только от его начального и конечного положений.

В своем первоначальном исследовании Гельмгольц принял систему единиц, основанную на измерении тепла, порождаемого током в проводнике. Рассматривая единицу силы тока в качестве произвольной, получаем для единицы сопротивления сопротивление

проводника, в котором эта единица силы тока порождает единицу тепла в единицу времени. Единицей электродвижущей силы в этой системе будет та, которая необходима для получения единицы силы тока в проводнике, обладающем единицей сопротивления.

Принятие этой системы единиц требует введения в уравнения коэффициента a , который является механическим эквивалентом единицы тепла. Так как мы неизменно придерживаемся или электростатической или электромагнитной системы единиц, этот коэффициент не встречается в приводимых здесь уравнениях.

544.] Гельмгольц также выводит ток индукции в том случае, когда проводящая цепь и цепь, по которой течет постоянный ток, движутся одна относительно другой *).

*) (Доказательства, данные в параграфах 543 и 544, неудовлетворительны, так как они не считаются с изменениями, которые могут возникнуть в токах, а также с изменениями, которые могут возникнуть в кинетической энергии движущихся цепей. Действительно, вывести уравнения индукции двух токов из одного принципа сохранения энергии столь же невозможно, как невозможно вывести уравнение движения системы с двумя степенями свободы без применения какого-либо иного принципа кроме принципа сохранения энергии.

Если мы применяем принцип сохранения энергии в случае двух токов, мы получаем одно уравнение, которое мы можем вывести следующим образом: пусть L , M , N будут соответственно коэффициент самоиндукции первой цепи, коэффициент взаимной индукции обеих цепей и самоиндукция второй цепи (параграф 578). Пусть T_e будет кинетическая энергия, относящаяся к токам, протекающим по цепям, и пусть остальная часть обозначений будет совпадать с принятой в параграфе 544.

Тогда (параграф 578)

$$T_e = \frac{1}{2} LI_1^2 + MI_1 I_2 + \frac{1}{2} NI_2^2,$$

$$\delta T_e = \frac{dT_e}{dI_1} \delta I_1 + \frac{dT_e}{dI_2} \delta I_2 + \sum \frac{dT_e}{dx} \delta x, \quad (1)$$

где x есть некоторая обобщенная координата, определяющая положение цепи.

Так как T_e является однородной квадратичной функцией I_1 и I_2 , то

$$2T_e = I_1 \frac{dT_e}{dI_1} + I_2 \frac{dT_e}{dI_2},$$

Пусть R_1, R_2 будут сопротивления, I_1, I_2 — токи, A_1, A_2 — внешние электродвижущие силы и V — потенциал одной цепи по отношению к другой, обусловленный единицей силы тока в каждой цепи. Тогда, как и ранее, мы имеем:

$$A_1 I_1 + A_2 I_2 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_1 I_2 \frac{dV}{dt}.$$

Если мы предположим, что I_1 — первичный ток и что I_2 настолько меньше I_1 , что он по индукции не производит какого-либо ощутительного изменения в I_1 , то мы можем положить:

$$I_1 = \frac{A_1}{R_1}.$$

Тогда

$$I_2 = \frac{A_2 - I_1 \frac{dV}{dt}}{R_2}$$

— результат, который может быть интерпретирован совершенно так же, как и в случае с магнитом.

откуда

$$2\delta T_e = \delta I_1 \frac{dT_e}{dI_1} + I_1 \delta \frac{dT_e}{dI_1} + \delta I_2 \frac{dT_e}{dI_2} + I_2 \delta \frac{dT_e}{dI_2}. \quad (2)$$

Вычитая (1) из (2), мы получаем:

$$\delta T_e = I_1 \delta \frac{dT_e}{dI_1} + I_2 \delta \frac{dT_e}{dI_2} - \sum \frac{dT_e}{dx} \delta x; \quad (3)$$

но $\frac{dT_e}{dx}$ есть сила типа x , действующая на систему. Если мы предположим, что на систему не действует никакая внешняя сила, $\sum \frac{dT_e}{dx} \delta x$ будет представлять приращение кинетической энергии T_m , обусловленное движением системы; поэтому (3) дает:

$$\delta(T_e + T_m) = I_1 \delta \frac{dT_e}{dI_1} + I_2 \delta \frac{dT_e}{dI_2}. \quad (4)$$

Работа, производимая батареями за время δt , равна:

$$A_1 I_1 \delta t + A_2 I_2 \delta t.$$

Тепло, производимое за тот же период времени, согласно за-

Если мы предположим, что I_2 — первичный ток и что I_1 гораздо меньше I_2 , мы получим для I_1 :

$$I_1 = \frac{A_1 - I_2 \frac{dV}{dt}}{R_1}.$$

Это показывает, что для одинаковых токов электродвижущая сила, наведенная первой цепью во второй, равна электродвижущей силе, наведенной второй цепью в первой, каковы бы ни были формы контуров цепей.

В своей работе Гельмгольц не обсуждает случая индукции, обусловленной усилением или ослаблением первичного тока, ни индукции тока на самого себя. Томсон *) применил тот же самый принцип к определению механического действия тока и указывал, что когда совершаемая работа производится совокупным

кочу Джоуля равно:

$$(R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2) \delta t.$$

По закону сохранения энергии работа, производимая батареями, должна равняться теплу, выделяющемуся в цепи плюс прирост энергии системы, откуда

$$A_1 I_1 \delta t + A_2 I_2 \delta t = (R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2) \delta t + \delta(T_e + T_m).$$

Представляя вместо $\delta(T_e + T_m)$ выражение из (4), мы получаем:

$$I_1 \left\{ A_1 - R_1 I_1 - \frac{d}{dt} \frac{dT_e}{dI_1} \right\} + I_2 \left\{ A_2 - R_2 I_2 - \frac{d}{dt} \frac{dT_e}{dI_2} \right\} = 0,$$

или

$$I_1 \left\{ A_1 - R_1 I_1 - \frac{d}{dt} (L I_1 + M I_2) \right\} + I_2 \left\{ A_2 - R_2 I_2 - \frac{d}{dt} (M I_1 + N I_2) \right\} = 0. \quad (5)$$

Уравнения индукции получаются приравнением нулю обоих выражений в скобках. Принцип сохранения энергии, однако, только показывает, что левая сторона уравнения (5) равна нулю, а не то, что каждое выражение, заключенное в скобки, в отдельности равно нулю. Подробное доказательство уравнений индуктированных токов дается в параграфе 581.)

*) Mechanical Theory of Electrolysis, Phil. Mag., декабрь 1851 г.

действием двух постоянных токов, их механическая сила *увеличивается* в той же степени, так что батарея должна обеспечить *двойную* величину работы в дополнение к той, которая требуется для поддержания токов против сопротивления цепей *).

545.] Введение В. Вебером системы абсолютных единиц для измерения электрических количеств является одним из наиболее важных шагов в прогрессе науки. Поставив вместе с Гауссом измерение магнитных количеств в первый ряд методов точного измерения, Вебер в своих «Электродинамических измерениях» не только излагает рациональные принципы установления подлежащих применению единиц, но и дает определения отдельных электрических величин в значениях этих единиц с ранее небывалой степенью точности. Этим исследованиям как электромагнитная, так и электростатическая системы единиц обязаны своим развитием и практическим применением.

Вебер также создал общую теорию электрического действия, из которой он выводит как электростатическую, так и электромагнитную силу, равно как и индукцию электрических токов. Мы рассмотрим эту теорию с некоторыми новейшими развитиями ее в отдельной главе (см. параграф 846).

*) Nichol's Cyclopaedia of Physical Sciences, изд. 1860 г., глава «Magnetism, Dynamical Relations of» и Reprint, § 571.



ГЛАВА IV

ОБ ИНДУКЦИИ ТОКА НА САМОГО СЕБЯ

546.] Свою девятую серию «Исследований» Фарадей посвятил изучению класса явлений, вызываемых током в проволоке, образующей катушку электромагнита.

Дженкин (Jenkin) наблюдал, что хотя и нельзя произвести чувствительный удар путем прямого действия вольтовой системы, состоящей только из одной пары пластинок, но если пропустить ток через катушку электромагнита и если затем прервать контакт между концами двух проводов, которые держат в руках, то все же будет чувствоваться небольшой удар. Такой удар не ощущается при установлении контакта.

Фарадей показал, что эти и другие явления, которые он описывает, относятся к тому же самому индуктивному действию, которое, как он уже наблюдал, вызывает ток на соседние проводники. В этом случае, однако, индуктивное действие оказывается на тот же проводник, который несет ток, и это действие очень сильно, так как сама проволока, несущая ток, ближе к различным элементам тока, чем может быть любая другая проволока.

547.] Однако Фарадей замечает *), что «первая мысль, которая приходит в голову, это та, что электричество обладает чем-то похожим на количество движения или инерцию в проводе». Действительно, если мы будем

*) Exp. Res., (1077) (см. русск. изд.).