

## ГЛАВА VI

## ДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

568.] В параграфе 552 мы показали, что электрический ток в проводящей цепи обладает способностью производить определенную механическую работу независимо от какой-либо внешней электродвижущей силы, поддерживающей этот ток. Но способность производить работу есть не что иное, как энергия, а энергия во всех видах одинакова по существу, хотя формы ее могут быть различны. Энергия электрического тока предстает как в той форме, которая определяется действительным движением материи, так и в той, которая заключается в возможности получить движение в результате наличия сил, действующих между телами, определенным образом расположенными относительно друг друга.

Первый вид энергии, энергия движения, называется *кинетической* энергией и представляется в качестве такого фундаментального факта природы, что мы с трудом можем допустить возможность сведения его к чему-либо другому. Второй вид энергии—энергия, зависящая от положения,—называется *потенциальной* энергией и обуславливается действием так называемых сил, иначе говоря, стремлений изменять относительное положение. Что касается этих сил, то хотя мы и можем признать их существование как установленный факт, однако всякое объяснение механизма, при помощи кото-

рого тела приводятся в движение, всегда представляет собой реальное увеличение наших знаний.

569.] Электрический ток нельзя рассматривать иначе, как некоторое кинетическое явление. Даже Фарадей, который постоянно старался освободить свою мысль от влияния тех представлений, которые слишком связаны со словами «электрический ток» и «электрический флюид», говорит об электрическом токе как о движении, а не о расположении \*).

Такие эффекты тока, как, например, электролиз и передача электричества от одного тела к другому,—все это действия распространения, протекающие во времени и, следовательно, обладающие природой движений.

Что же касается скорости тока, то мы уже показали, что ничего о ней не знаем, она может быть и одной десятой дюйма в час, и сотней тысяч миль в секунду \*\*). Во всяком случае мы находимся столь далеко от знания ее абсолютной величины, что нам даже неизвестно, является ли то, что мы называем положительным направлением,—действительным направлением движения или же наоборот.

Здесь мы утверждаем только то положение, что электрический ток заключает в себе движение какого-то рода. То, что является причиной электрических токов, было названо *электродвижущей силой*. Это наименование в течение долгого времени применялось с большим успехом и никогда не приводило к каким-либо противоречиям в языке науки. Электродвижущая сила всегда понимается, как влияющая только на электричество, а не на тела, в которых находится это электричество. Электродвижущая сила никогда не должна быть смешиваема с обычной механической силой, действующей только на тела, а не на электричество в них. Если мы когда-либо придем к познанию природы отношения между электричеством и обычной материей, мы,

\*) Exp. Res., (283) (см. русск. изд.).

\*\*\*) Exp. Res., (1648) (см. русск. изд.).

повидимому, также узнаем отношение между электродвижущей силой и обыкновенной силой.

570.] Когда обычная сила действует на тело и когда тело уступает действию силы, работа измеряется произведением силы на величину перемещения тела под действием силы. Так, например, в случае воды, проталкиваемой через трубу, работа, произведенная в любом сечении, измеряется давлением жидкости в этом сечении, помноженным на количество воды, проходящей через это сечение.

Аналогично этому работа, произведенная электродвижущей силой, измеряется произведением электродвижущей силы на количество электричества, проходящего через сечение проводника под действием электродвижущей силы.

Работа, произведенная какой-либо электродвижущей силой, будет в точности того же рода, что и работа, произведенная обыкновенной силой, и обе работы измеряются теми же самыми эталонами или единицами.

Часть работы, произведенной электродвижущей силой, действующей на проводящую цепь, растрачивается на преодоление сопротивления цепи, и эта часть работы тем самым превращается в тепло.

Другая часть работы идет на возбуждение электромагнитных явлений, наблюдавшихся Ампером, в которых проводники приводятся в движение электромагнитными силами. Остаток работы затрачивается на увеличение кинетической энергии тока, и эффект этой части действия электродвижущей силы обнаруживается в явлениях индукции токов, наблюдавшихся Фарадесом.

Таким образом, мы достаточно знаем относительно электрических токов для того, чтобы признать в системе материальных проводников, несущих ток, динамическую систему, являющуюся местонахождением энергии, часть которой может быть кинетической энергией, а часть потенциальной.

Природа связей частей этой системы нам неизвестна, но, поскольку мы имеем динамические методы исследо-

вания, которые не требуют знания механизма системы, мы будем их применять к этому случаю.

Мы прежде всего изучим следствия допущения, что функция, выражающая кинетическую энергию системы, имеет наиболее общую форму.

571.] Пусть система состоит из некоторого числа проводящих цепей, форма и положение которых определяются значениями системы переменных  $x_1, x_2$  и т. д., число которых равно числу степеней свободы системы.

Если вся кинетическая энергия системы была бы связана с движением этих проводников, она была бы выражена в форме

$$T = \frac{1}{2} (x_1 x_1) \dot{x}_1^2 + \dots + (x_1 x_2) \dot{x}_1 \dot{x}_2 + \dots,$$

где символы  $(x_1 x_1)$  и т. д. обозначают величины, которые мы назвали моментами инерции, а символы  $(x_1 x_2)$  и т. д. обозначают произведения инерции.

Если  $X'$  есть приложенная сила, стремящаяся увеличить координату  $x$  и необходимая для того, чтобы произвести действительное движение, то согласно уравнению Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \frac{dT}{dx} - \frac{dT}{dx} = X'.$$

В тех случаях, когда  $T$  обозначает энергию, относящуюся только к видимому движению, мы будем ее обозначать значком  $m$ , т. е.  $T_m$ .

Но в системе проводников, по которым проходят электрические токи, часть кинетической энергии связана с существованием этих токов. Пусть движение электричества будет определено другой системой координат  $y_1, y_2$  и т. д. Тогда  $T$  будет однородной функцией квадратов и произведений всех скоростей двух систем координат. Мы поэтому можем разделить  $T$  на три части, в первой из которых— $T_m$ —встречаются только скорости координат  $x$ , во второй— $T_e$ —скорости

координат  $y$ , а в третьей— $T_{me}$ —каждый член представляет собой произведение скоростей обеих координат  $x$  и  $y$ .

Отсюда мы имеем:

$$T = T_m + T_e + T_{me},$$

где

$$T_m = \frac{1}{2} (x_1 \dot{x}_1) \dot{x}_1^2 + \dots + (x_1 \dot{x}_2) \dot{x}_1 \dot{x}_2 + \dots,$$

$$T_e = \frac{1}{2} (y_1 \dot{y}_1) \dot{y}_1^2 + \dots + (y_1 \dot{y}_2) \dot{y}_1 \dot{y}_2 + \dots,$$

$$T_{me} = (x_1 \dot{y}_1) \dot{x}_1 \dot{y}_1 + \dots$$

572.] В общей динамической теории коэффициенты всех членов могут быть функциями всех координат  $x$  и  $y$ . В случае электрических токов легко, однако, видеть, что координаты вида  $y$  не входят в коэффициенты.

Действительно, если все электрические токи поддерживаются постоянными, а проводники находятся в состоянии покоя, общее состояние поля останется неизменным. Но в этом случае координаты  $y$  являются переменными, хотя скорости  $\dot{y}$  постоянны. Поэтому координаты  $y$  не могут входить в выражение для  $T$  или в другое какое-нибудь выражение, характеризующее фактическое состояние системы.

Помимо этого в силу уравнения непрерывности, если все проводники являются линейными цепями, то требуется только одна переменная величина для выражения силы тока в каждом проводнике. Пусть скорости  $\dot{y}_1$ ,  $\dot{y}_2$  и т. д. представляют собой силы токов в различных проводниках.

Все это остается справедливым, если вместо электрических токов мы имели бы токи несжимаемой жидкости, текущей в гибких трубках. В этом случае скорости этих токов вошли бы в выражение для  $T$ , но коэффи-

циенты зависели бы только от переменных  $x$ , которые определяют форму и положение труб.

В случае с жидкостью движение жидкости в одной трубе не влияет непосредственно на движение любой другой трубы или жидкости в ней. Отсюда в выражении для  $T_e$  встречаются только квадраты скоростей  $\dot{y}$ , а не их произведения, и в выражении для  $T_{me}$  какая-нибудь скорость  $\dot{y}$  в трубе связана только с такими скоростями формы  $x$ , которые относятся к той же трубе.

В случае электрических токов мы знаем, что это ограничение не имеет места, так как токи в различных проводниках влияют один на другой. Отсюда мы должны допустить существование членов формы  $\dot{y}_1 \dot{y}_2$ , а это указывает на существование чего-то, находящегося в движении, причем это движение зависит от силы обоих электрических токов  $\dot{y}_1$  и  $\dot{y}_2$ . Эта движущая материя, какого бы рода она ни была, не находится внутри проводников, несущих оба тока, но, вероятно, распространена по всему пространству, окружающему их (6).

573.] Выясним теперь, какую форму принимают в этом случае уравнения движения Лагранжа.

Пусть  $X'$  будет приложенная сила, соответствующая координате  $x$ , одной из тех, которые определяют форму и положение проводящих цепей. Эта сила в обычном смысле этого слова, стремящаяся изменить положения частей системы, дана уравнением

$$X' = \frac{d}{dt} \frac{dT}{dx} - \frac{dT}{dx}.$$

Мы можем рассматривать эту силу как сумму трех частей, соответствующих трем частям, на которые мы разделили кинетическую энергию системы и которые мы обозначим теми же самыми значками. Отсюда

$$X' = X'_m + X'_e + X'_{me}.$$

Часть  $X'_m$  определяется обычными динамическими соображениями, так что нет необходимости специально ей заниматься.

Поскольку  $T_e$  не содержит  $\dot{x}$ , то первый член выражения для  $X'_e$  равен нулю и его значение сводится к

$$X'_e = -\frac{dT_e}{dx}.$$

Это есть выражение механической силы, которая должна быть приложена к проводнику, чтобы уравновесить электромагнитную силу; она равна отрицательной производной чисто электрокинетической энергии, соответствующей изменению координаты  $x$ . Электромагнитная сила  $X_e$ , которую уравновешивает эта внешняя механическая сила, равна и противоположна по знаку  $X'_e$ . Значение величины  $X_e$ , поскольку она зависит от квадратов и произведений силы токов, остается неизменным при перемене направлений всех токов.

Третья часть  $X'$  равна:

$$X'_{me} = \frac{d}{dt} \frac{dT_{me}}{dx} - \frac{dT_{me}}{dx}.$$

Величина  $T_{me}$  содержит только произведения вида  $\dot{x}\dot{y}$ , так что  $\frac{dT_{me}}{dx}$  есть линейная функция сил

токов  $\dot{y}$ . Первый член, следовательно, зависит от степени изменения сил токов в единицу времени и дает механическую силу, действующую на проводник; эта сила равна нулю, когда токи постоянны, она положительна или отрицательна в зависимости от того: увеличиваются или уменьшаются силы токов.

Второй член зависит не от изменения токов, а от их величины в данный момент. Так как он является линейной функцией этих токов, он меняет свой знак в тех случаях, когда токи меняют свой знак. Так как оба члена содержат скорость  $\dot{x}$ , они равны нулю, когда проводники находятся в покое. Эти замечания отно-

сятся также и к членам, зависящим от изменений во времени коэффициентов при  $\dot{y}$  в выражении  $\frac{dT_{me}}{dx}$ .

Мы поэтому можем исследовать эти члены порознь. Если проводники находятся в покое, мы имеем дело только с первым членом, если же токи постоянны, — только со вторым членом.

574.] Поскольку важно определить, имеет ли какая-либо часть кинетической энергии форму  $T_{me}$ , состоящую из произведений обычных скоростей и сил электрических токов, желательно, чтобы эксперименты в этой области производились с большой тщательностью.

Определение сил, действующих на тела, находящиеся в быстром движении, весьма затруднительно. Поэтому обратимся к первому члену, который зависит только от изменения силы тока.

Если какая-нибудь часть кинетической энергии зависит от произведения обычной скорости и силы тока, она, повидимому, может легче всего наблюдаться тогда, когда скорость и ток направлены в одну и ту же или в противоположные стороны. Поэтому мы возьмем круглую катушку с большим числом витков и подвесим ее на тонкой вертикальной проволоке так, чтобы ее витки были горизонтальны и чтобы она могла вращаться около вертикальной оси или в том же самом направлении, в каком течет ток в катушке, или в противоположном.

Допустим, что ток подводится к катушке при посредстве проволоки, на которой она подвешена. Пройдя по всем виткам, ток идет далее вниз через проволоку в направлении подвеса, и цепь замыкается через сосуд с ртутью, в который опущена проволока.

Так как действие горизонтальной слагающей земного магнетизма будет стремиться поворачивать катушку около горизонтальной оси, мы предположим, что горизонтальная слагающая земного магнетизма в точности нейтрализуется системой неподвижных магнитов или что опыт производится на магнитном полюсе.

К катушке прикреплено вертикальное зеркальце для того, чтобы можно было обнаружить любой ее поворот.

Теперь пропустим через катушку ток в направлении север—восток—юг—запад. Если бы электричество было жидкостью, подобной воде, текущей вдоль проволоки, то при возникновении тока и в течение времени

нарастания его скорости потребовалась бы сила для изменения момента количества движения жидкости, протекающей через катушку; поскольку же эта сила должна быть создана за счет упругости проволоки, на которой подвешена система, то катушка повернулась бы в начальный момент в сторону, противоположную току или в направлении запад—юг—восток—север, и это было бы обнаружено при помощи прикрепленного зеркальца. В случае прекращения тока наблюдалось бы другое движение зеркальца, на этот раз в том же направлении, в котором течет ток. Однако до сего времени не наблюдалось явлений такого рода. Такое действие, если бы оно существовало, могло бы быть легко обнаружено из уже известных действий тока в следующих случаях.

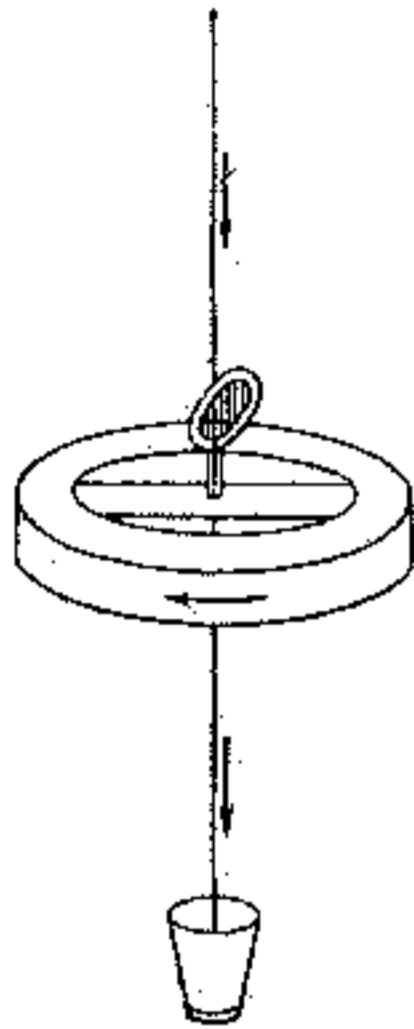


Рис. 10.

(1) Это происходило бы только тогда, когда сила тока изменяется или когда устанавливается или прерывается контакт, но не при постоянном токе.

Все известные *механические* действия тока зависят от силы тока, а не от изменений этой силы. Электродвижущую силу в случае индуцированных токов не следует смешивать с этим электромагнитным действием.

(2) Направление этого действия было бы обратным в том случае, если бы было изменено на обратное направление всех токов в поле.

Все известные механические действия токов остаются неизменными в случае обращения всех токов, так

как они зависят от квадратов и произведений этих токов.

Если бы было открыто какое-либо действие такого рода, мы могли бы рассматривать один из так называемых родов электричества, или положительное, или отрицательное, как реальную субстанцию, и мы имели бы возможность описывать электрический ток как истинное движение субстанции в определенном направлении. Действительно, если бы электрические движения в какой-либо мере были бы сравнимы с движениями обыкновенной материи, существовали бы члены формы  $T_{me}$ , и их существование обнаружилось бы наличием механической силы  $X_{me}$ .

Согласно гипотезе Фехнера (Fechner), что электрический ток состоит из двух одинаковых токов положительного и отрицательного электричества, текущих в противоположных направлениях по одному и тому же проводнику, выражения вида  $T_{me}$  исчезли бы, так как каждому члену, относящемуся к положительному току, соответствовал бы член равной величины, но обратного знака, относящийся к отрицательному току, и явления, зависящие от этих членов, не имели бы места.

Однако мне кажется, что хотя мы получаем большую пользу от многих аналогий между электрическим током и током материальной жидкости, мы должны тщательно избегать каких-либо допущений, не подтвержденных экспериментально. До сих пор эксперимент не отвечает на вопрос о том, является ли электрический ток действительно током материальной субстанции или же двойным током, а также насколько велика или мала его скорость, измеренная в футах в секунду.

Познание этих вещей привело бы по меньшей мере к началам полной динамической теории электричества. В такой теории мы могли бы рассматривать электрические действия не как явления неизвестной причины, лишь подчиняющиеся общим законам динамики, что делается в этом трактате, но как результат известных

движений известных частей материи, в которых не только общие эффекты и конечные результаты, но и весь промежуточный механизм и детали движения принимаются в качестве объектов изучения (?).

575.] Экспериментальное исследование второй части  $X_{me}$ , а именно  $\frac{dT_{me}}{dx}$ , более трудно, так как оно

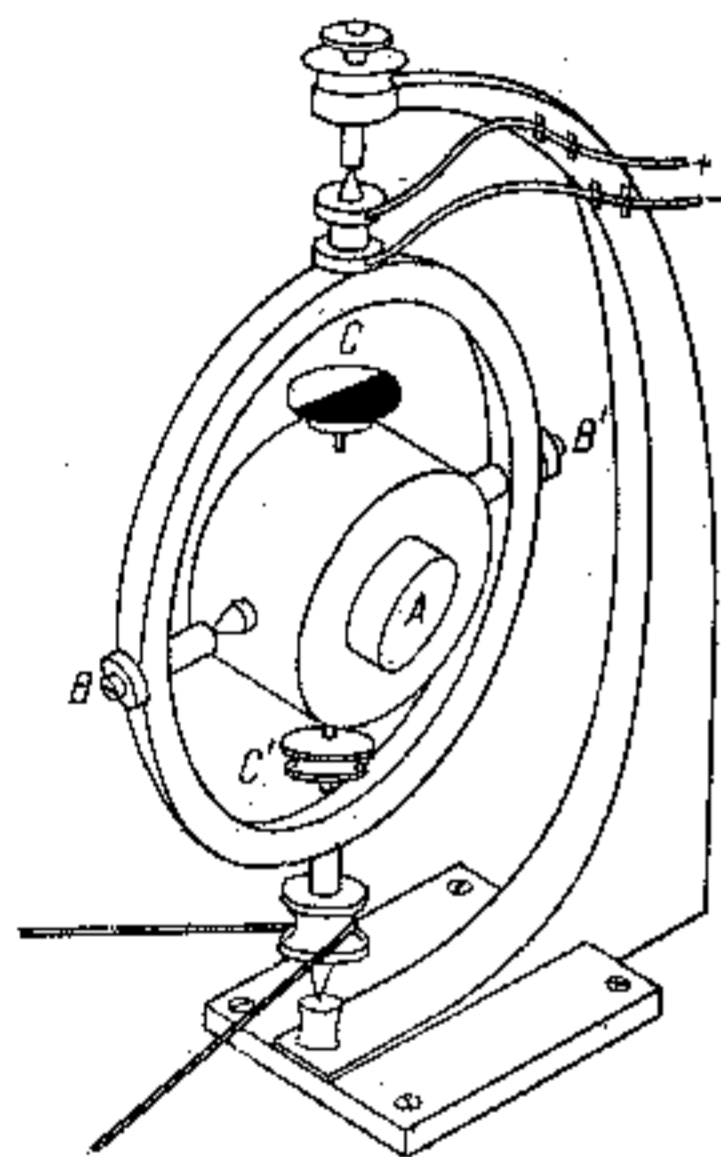


Рис. 11.

включает в себя наблюдение действия сил на тело, находящееся в быстром движении.

На рис. 11 показан аппарат, сконструированный мною в 1861 г. с целью проверить существование силы такого рода.

Электромагнит  $A$  может вращаться около горизонтальной оси  $BB'$  в кольце, которое само по себе вращается около вертикальной оси.

Пусть  $A$ ,  $B$ ,  $C$  будут моменты инерции электромагнита относительно оси катушки, горизонтальной оси  $BB'$  и третьей оси  $CC'$  соответственно.

Пусть  $\theta$  будет угол, который  $CC'$  образует с вер-

тикалью,  $\varphi$  — азимут оси  $BB'$ , а  $\psi$  — переменная, от которой зависит движение электричества в катушке.

Тогда кинетическая энергия  $T$  электромагнита может быть написана так:

$$2T = A\dot{\varphi}^2 \sin^2 \theta + B\dot{\theta}^2 + C\dot{\psi}^2 \cos^2 \theta = E(\dot{\varphi} \sin \theta + \dot{\psi})^2,$$

где  $E$  есть величина, которую можно назвать моментом инерции электричества в катушке.

Если  $\Theta$  есть момент приложенной силы, стремящейся увеличивать  $\theta$ , мы согласно уравнениям динамики имеем:

$$\Theta = B \frac{d^2 \theta}{dt^2} - \left\{ (A - C) \dot{\varphi}^2 \sin \theta \cos \theta + E \dot{\psi} \cos \theta (\dot{\varphi} \sin \theta + \dot{\psi}) \right\}.$$

Приравняв нулю силу  $\Psi$ , стремящуюся увеличить  $\psi$ , получим:

$$\dot{\varphi} \sin \theta + \dot{\psi} = \gamma,$$

где  $\gamma$  — постоянная, которую мы можем рассматривать как представляющую силу тока в катушке.

Если  $C$  несколько больше, чем  $A$ ,  $\theta$  будет равно нулю, и равновесие относительно оси  $BB'$  будет устойчивым, когда

$$\sin \theta = \frac{E\gamma}{(C - A)\dot{\varphi}}.$$

Это значение  $\theta$  зависит от  $\gamma$ , т. е. от силы электрического тока и является положительным или отрицательным в зависимости от направления тока.

Ток пропускается в катушку через подшипники  $B$  и  $B'$ , которые соединены с батареей при посредстве пружинок, трущихся о металлические кольца, укрепленные на вертикальной оси.

Для того чтобы определить величину  $\theta$ , в  $C$  помещается бумажный диск, разделенный по диаметру, параллельному направлению  $BB'$ , на две части, одна из которых окрашена в красный, а другая в зеленый цвет.

Когда инструмент находится в движении при положительном  $\theta$ , в  $C$  виден красный круг, радиус которого грубо указывает величину  $\theta$ . Если  $\theta$  отрицательно, в точке  $C$  виден зеленый круг.

При помощи гаек, передвигающихся на винтах, прикрепленных к электромагниту, ось  $CC'$  устанавливается как главная ось, момент инерции относительно которой настолько превышает момент инерции отно-

сительно оси  $A$ , чтобы сделать инструмент весьма чувствительным к действию силы, если она существует.

Основным затруднением при проведении опытов было возмущающее действие земного магнетизма, которое заставляло электромагнит действовать как магнитную стрелку наклона. Вследствие этого полученные результаты были весьма грубыми. Но даже когда в катушку вставлялся железный сердечник, что превращало ее в мощный электромагнит, не было указаний на какое-либо изменение  $\theta$ .

Следовательно, если магнит содержит материю, находящуюся в быстром вращении, момент количества движения должен быть весьма малым по сравнению с любыми величинами, которые мы можем измерить, и мы до сих пор не имеем каких-либо признаков существования членов  $T_{me}$ , проявляющихся в механических действиях.

576.] Рассмотрим теперь силы, действующие на токи электричества, т. е. электродвижущие силы.

Пусть  $Y$  будет эффективная электродвижущая сила индукционного происхождения; внешняя электродвижущая сила, которая должна действовать на цепь, чтобы уравновесить  $Y$ , будет  $Y' = -Y$ , и по уравнению Лагранжа

$$Y = -Y' = -\frac{d}{dt} \frac{dT}{dy} + \frac{dT}{dy}.$$

Так как в  $T$  нет членов, заключающих координаты  $y$ , второй член равен нулю, и  $Y$  сводится к первому члену. Поэтому электродвижущая сила не может существовать в системе, находящейся в покое и в которой текут постоянные токи.

Далее, если мы разделим  $Y$  на три части,  $Y_m$ ,  $Y_e$ ,  $Y_{me}$ , соответствующие трем частям  $T$ , мы найдем, что, поскольку  $T_m$  не содержит  $y$ ,  $Y_m = 0$ .

Мы также находим:

$$Y_e = -\frac{d}{dt} \frac{dT_e}{dy}.$$

Здесь  $\frac{dT_e}{dy}$  является линейной функцией сил токов. Это— электродвижущая сила индукции, открытая Фарадеем. Более подробно мы ее рассмотрим в дальнейшем.

577.] Из части  $T$ , зависящей от скоростей, помноженных на токи, мы находим:

$$Y_{me} = -\frac{d}{dt} \frac{dT_{me}}{dy}.$$

Но  $\frac{dT_{me}}{dy}$  есть линейная функция скоростей проводников. Если, следовательно, члены  $T_{me}$  имели бы реальное существование, было бы возможно получать электродвижущую силу независимо от токов простым изменением скоростей проводников. Так, например, в случае подвешенной катушки, описанной в параграфе 574, если мы эту катушку из состояния покоя внезапно приведем во вращение около вертикальной оси, должна была бы возникнуть электродвижущая сила, пропорциональная ускорению этого движения. Она исчезла бы, когда движение сделалось бы равномерным, и имела бы обратное направление, если бы движение замедлялось.

Весьма малое количество научных наблюдений может быть произведено с большей точностью, чем то, которое при помощи гальванометра констатирует существование или отсутствие тока. Точность этого метода намного превышает точность большинства приспособлений для измерения механических сил, действующих на тело. Если, следовательно, какие-нибудь токи могли бы быть произведены указанным способом, они были бы обнаружены, даже будучи очень малыми. Эти токи отличались бы от обычных токов индукции следующими свойствами.

(1) Они вполне зависели бы от движений проводников и ни в какой степени от силы токов или магнитных сил, уже существующих в поле.

(2) Они зависели бы не от абсолютных скоростей проводников, но от их ускорений и от квадратов и произведений скоростей и они изменяли бы знак в тех

случаях, когда ускорение сменялось бы замедлением, а абсолютная величина скорости оставалась бы той же самой.

Однако во всех донные фактически наблюдавшихся случаях индуктированные токи полностью зависят от силы токов и изменений силы токов в поле и не могут быть возбуждены в поле, в котором отсутствуют магнитные силы и токи. В той мере, в какой они зависят от движения проводников, они зависят от скоростей, а не от изменений скоростей этих движений.

Таким образом, мы имеем три метода обнаружения существования членов формы  $T_{me}$ , ни один из которых до сих пор не привел к положительному результату. Я изложил их с большой тщательностью потому, что твердая уверенность касательно пункта, имеющего столь существенное значение для теории электричества, кажется мне весьма важной.

Поскольку до сих пор не было получено никакого очевидного доказательства существования таких членов, я в дальнейшем буду исходить из допущения, что они не существуют или, по меньшей мере, не дают заметного эффекта, что значительно упростит нашу динамическую теорию<sup>(8)</sup>. Однако мы будем иметь случай, обсуждая отношение магнетизма к явлениям света, показать, что движение, которое представляет собой свет, может входить как фактор в члены, выражающие движения, составляющие сущность магнетизма.



## ГЛАВА VII

### ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

578.] Обратим теперь наше внимание на ту часть кинетической энергии системы, которая зависит от квадратов и произведений сил электрических токов. Мы будем называть эту часть *электрокинетической* энергией системы. Часть, зависящая от движения проводников, относится к обычной динамике, части же, зависящей от произведений скоростей и токов, как мы это видели, не существует.

Пусть  $A_1, A_2$  и т. д. обозначают различные проводящие цепи. Пусть их форма и относительное положение выражаются в переменных  $x_1, x_2$  и т. д., число которых равно числу степеней свободы механической системы. Эти величины мы будем называть *геометрическими переменными*.

Пусть  $y_1$  обозначает количество электричества, которое прошло через данное сечение проводника  $A_1$ , начиная от начального момента времени  $t$ . Сила тока будет обозначаться через  $\dot{y}_1$ , производную этого количества.

Действительный ток мы будем обозначать через  $y_1$ , а через  $y_1$  — интегральный ток. Для каждого тока в системе имеется одна переменная такого рода.

Пусть  $T$  обозначает электрокинетическую энергию системы. Она является однородной функцией второй