


как в максвелловом уравнении [1а], мы полагаем $C = \frac{1}{4}$. Затруднение состоит здесь в том, что μ почти во всех веществах приблизительно одинаково, а ρ должно быть обратно пропорционально i^2 . При этом следовало бы все-таки полагать, что для различных веществ количество вихрей, проходящих через единицу поперечного сечения, различно, иначе говоря, неодинакова плотность расположения вихрей, а следовательно, и величина C .

ДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ





ЧАСТЬ I
ВВЕДЕНИЕ *) (1)

(1) Наиболее очевидным механическим явлением при электрических и магнитных опытах является взаимодействие, благодаря которому тела, находящиеся в определенных состояниях, приводят друг друга в движение, несмотря на наличие между ними довольно значительного расстояния.

Поэтому для научной трактовки этих явлений прежде всего необходимо установить величину и направление действующей между телами силы, и если найдено, что эта сила в какой-то мере зависит от относительного положения тел и от их электрического или магнитного состояния, то с первого взгляда кажется естественным объяснение этих фактов путем допущения существования чего-то другого, находящегося в покое или в движении в каждом теле, образующего его электрическое или магнитное состояние и способного действовать на расстоянии в соответствии с математическими законами.

Таким путем возникли математические теории статического электричества, магнетизма, механического действия между проводниками, несущими токи, и теория индукции токов.

В этих теориях сила, действующая между двумя телами, рассматривается лишь как зависящая от состоя-

*) *Royal Society Transactions, т. CLV 1864.

ния тел и их относительного положения, окружающая среда не принимается во внимание.

Эти теории допускают более или менее явным образом существование субстанций, частицы которых обладают способностью действовать друг на друга на расстоянии. Наиболее полная разработка теории этого рода принадлежит В. Веберу*), который включил в нее как электростатические, так и электромагнитные явления.

Сделав это, он, однако, вынужден был допустить, что сила, действующая между двумя электрическими частичками, зависит не только от их взаимного расстояния, но и от их относительной скорости.

Эта теория, так как она была развита Вебером и Нейманом**), чрезвычайно остроумна и удивительно исчерпывающа в ее применении к явлениям статического электричества, электромагнитных притяжений, индукции токов и диамагнитных явлений; эта теория для нас тем более авторитетна, что она была руководящей идеей того, кто сделал столь большие успехи в практической части науки об электричестве как путем введения постоянной системы единиц в электрические измерения, так и путем фактического определения электрических величин с неизвѣстной до сих пор точностью⁽²⁾.

(2) Однако механические трудности, связанные с допущением существования частиц, действующих на расстоянии с силами, зависящими от их скоростей, таковы, что они не дают мне возможности рассматривать эту теорию как окончательную, хотя возможно, что она и сейчас может быть полезной в отношении установления координации между явлениями.

Поэтому я предпочел искать объяснения фактов в другом направлении, предполагая, что они являются результатом процессов, которые происходят как

*) Elektrodynamische Maassbestimmungen, Leipzig, Trans., т. I, 1849, и Taylor's Scientific Memoirs, т. V, глава XIV.

**) «Explicare tentatur quomodo fiat ut lucis planum polarizationis per vires electricas vel magneticas declinetur», Halis Saxo-num, 1858.

в окружающей тела среде, так и в самих возбужденных телах, и пытаюсь объяснить взаимодействия между удаленными друг от друга телами без допущения существования сил, способных непосредственно действовать на заметных расстояниях.

(3) Та теория, которую я предлагаю, может быть названа теорией *электромагнитного поля*, потому что она имеет дело с пространством, окружающим электрические или магнитные тела, и она может быть названа также *динамической* теорией, поскольку она допускает, что в этом пространстве имеется материя, находящаяся в движении, посредством которой и производятся наблюдаемые электромагнитные явления.

(4) Электромагнитное поле—это та часть пространства, которая содержит в себе и окружает тела, находящиеся в электрическом или магнитном состоянии⁽³⁾.

Это пространство может быть наполнено любым родом материи или мы можем попытаться удалить из нее всю плотную материю, как это имеет место в трубках Гейслера или в других, так называемых вакуумных⁽⁴⁾. Однако всегда имеется достаточное количество материи для того, чтобы воспринимать и передавать волновые движения света и тепла. И так как передача излучений не слишком сильно изменяется, если так называемый вакуум заменить прозрачными телами с заметной плотностью, то мы вынуждены допустить, что эти волновые движения относятся к эфирной субстанции, а не к плотной материи, присутствие которой только в какой-то мере изменяет движение эфира.

Мы поэтому имеем некоторое основание предполагать, исходя из явлений света и тепла, что имеется какая-то эфирная среда, заполняющая пространство и пронизывающая все тела, которая обладает способностью быть приводимой в движение, передавать это движение от одной своей части к другой и сообщать это движение плотной материи, нагревая ее и действуя на нее разнообразными способами.

(5) Энергия, сообщенная телу нагреванием, должна была ранее существовать в движущейся среде, ибо вол-

новые движения оставили источник тепла за некоторое время до того, как они достигли самого нагреваемого тела, и в течение этого времени энергия должна была существовать наполовину в форме движения среды и наполовину в форме упругого напряжения. Исходя из этих соображений, профессор В. Томсон *) доказывал, что эта среда должна обладать плотностью, сравнимой с плотностью обычной материи, и даже определил нижнюю границу этой плотности.

(6) Поэтому мы можем как данное, выведенное из отрасли науки, независимой от той, с которой мы (в рассматриваемом случае) имеем дело, принять существование проникающей среды, обладающей малой, но реальной плотностью, обладающей способностью быть приводимой в движение и передавать движения от одной части к другой с большой, но не бесконечной скоростью.

Следовательно, части этой среды должны быть так связаны, что движение одной части каким-то способом зависит от движения остальных частей, и в то же самое время эти связи должны быть способны к определенному роду упругого смещения, поскольку сообщение движения не является мгновенным, а требует времени.

Поэтому эта среда обладает способностью получать и сохранять два вида энергии, а именно «актуальную» энергию, зависящую от движения ее частей, и «потенциальную» энергию, представляющую собой работу, которую среда выполнит в силу своей упругости, возвращаясь к первоначальному состоянию, после того смещения, которое она испытала.

Распространение колебаний состоит в непрерывном преобразовании одной из этих форм энергии в другую попеременно, и в любой момент количество энергии во всей среде разделено поровну, так что половина энергии является энергией движения, а другая половина — энергией упругого напряжения.

*) W. Thomson, «On the Possible Density of the Luminiferous Medium and on the Mechanical Value of a Cubic Mile of Sun-light», Transactions of the Royal Society of Edinburgh, стр. 57, 1854.

(7) Среда, имеющая такого рода структуру, может быть способна к другим видам движения и смещения, чем те, которые обуславливают явления света и тепла; некоторые из них могут быть таковы, что они воспринимаются нашими чувствами при посредстве тех явлений, которые они производят.

(8) Сейчас мы знаем, что светоносная среда в отдельных случаях испытывает действие магнетизма, так как Фарадей *) открыл, что в тех случаях, когда плоско поляризованный луч проходит через прозрачную диамагнитную среду в направлении магнитных силовых линий, образуемых магнитами или токами, то плоскость поляризации начинает вращаться.

Это вращение всегда происходит в том направлении, в котором положительное электричество должно проходить вокруг диамагнитного тела для того, чтобы образовать действующее магнитное поле (5).

Верде **) с тех пор открыл, что если заменить диамагнитное тело парамагнитным, например раствором треххлористого железа в эфире, то вращение происходит в обратном направлении.

Профессор В. Томсон ***) указал, что никакое распределение сил, действующих между частями какой-либо среды, единственным движением которой является движение световых колебаний, недостаточно для объяснения этих явлений, но что мы должны допустить существование в среде движения, зависящего от намагничивания, в дополнение к тому колебательному движению, которое представляет собой свет.

Совершенно правильно, что вращение плоскости поляризации вследствие магнитного воздействия наблюдалось только в средах, обладающих заметной плотностью. Но свойства магнитного поля не так уже сильно изменяются при замене одной среды другой или ваку-

*) «Exp. Res.», серия XIX.

**) Verdet, Comptes rendus, 1856, второе полугодие, стр. 529 и 1857, первое полугодие, стр. 1209.

***) W. Thomson, Proceedings of the Royal Society, июнь 1856 г. и июнь 1861 г.

умом, чтобы позволить нам допустить, что плотная среда делает нечто большее, чем простое изменение движения эфира. Мы поэтому имеем законное основание поставить вопрос: не происходит ли движение эфирной среды везде, где бы ни наблюдались магнитные эффекты? Мы имеем некоторое основание предположить, что это движение является движением вращения, имеющим своей осью направление магнитной силы.

(9) Мы можем теперь обсудить другое явление, наблюдаемое в электромагнитном поле. Когда тело движется, пересекая линии магнитной силы, оно испытывает то, что называют электродвижущей силой; два противоположных конца тела электризуются противоположным образом, и электрический ток стремится пройти через тело. Когда электродвижущая сила достаточно велика и действует на некоторые химически сложные тела, она их разлагает и заставляет одну из компонент направляться к одному концу тела, а другую—в прямо противоположную сторону ⁽⁶⁾.

В данном случае мы имеем очевидное проявление силы, вызывающей электрический ток вопреки сопротивлению и электризующей концы тела противоположным образом; это особое состояние тела поддерживается только воздействием электродвижущей силы, и как только эта сила устраняется, оно стремится с равной и противоположно направленной силой вызывать обратный ток через тело и восстановить его первоначальное электрическое состояние. Наконец, если эта сила достаточно велика, она разлагает химические соединения и перемещает компоненты в двух противоположных направлениях, в то время как их естественной тенденцией является тенденция к взаимному соединению с такой силой, которая может породить электродвижущую силу обратного направления.

Эта сила, следовательно, является силой, действующей на тело по причине его движения через электромагнитное поле или вследствие изменений, возникающих в самом этом поле; действие этой силы проявляется или в порождении тока и нагревании тела или

в разложении тела, или если она не может сделать ни того, ни другого, то в приведении тела в состояние электрической поляризации—состояние вынужденное, при котором концы тела наэлектризованы противоположным образом и от которого тело стремится освободиться, как только будет удалена возмущающая сила.

(10) Согласно предлагаемой мною теории эта «электродвижущая сила» является силой, возникающей при передаче движения от одной части среды к другой, так что именно благодаря этой силе движение одной части вызывает движение другой. Когда электродвижущая сила действует вдоль проводящего контура, она производит ток, который в том случае, если он встречает сопротивление, вызывает постоянное превращение электрической энергии в тепло; последнее уже нельзя восстановить в форме электрической энергии каким-либо обращением процесса.

(11) Но когда электродвижущая сила действует на диэлектрик, она создает состояние поляризации его частей, которое аналогично поляризации частей массы железа под влиянием магнита и которое подобно магнитной поляризации может быть описано как состояние, в котором каждая частица имеет противоположные концы в противоположных состояниях *).

В диэлектрике, находящемся под действием электродвижущей силы, мы можем представлять, что электричество в каждой молекуле так смещено, что одна сторона молекулы делается положительно наэлектризованной, а другая—отрицательно наэлектризованной, однако электричество остается полностью связанным с молекулой и не переходит от одной молекулы к другой. Эффект этого воздействия на всю массу диэлектрика выражается в общем смещении электричества в определенном направлении. Это смещение не равноценно току, потому что, когда оно достигает определенной степени, оно остается неизменным, но оно есть начало тока, и его

*) Faraday, «Exp. Res.», серия XI; Mossotti, Mem. della Soc. Italiana (Modena), т. XXIV, часть 2, стр. 49.

наменения образуют токи в положительном или отрицательном направлениях сообразно тому, увеличивается или уменьшается смещение (7). Внутри диэлектрика нет признаков какой-либо электризации, так как электризация поверхности любой молекулы нейтрализуется противоположной электризацией поверхности молекулы, находящейся в соприкосновении с нею; но на граничной поверхности диэлектрика, где электризация не нейтрализуется, мы обнаруживаем явления, указывающие на положительную или отрицательную электризацию этой поверхности.

Отношение между электродвижущей силой и величиной электрического смещения, которое оно вызывает, зависит от природы диэлектрика, причем та же самая электродвижущая сила обычно производит большее электрическое смещение в твердых диэлектриках, как, например, в стекле или сере, чем в воздухе.

(12) Здесь, таким образом, мы усматриваем еще один эффект электродвижущей силы, а именно электрическое смещение, которое согласно нашей теории является некоторым родом упругой податливости действию силы, похожей на ту, которая имеет место в сооружениях и машинах по причине несовершенной жесткости связей.

(13) Практическое исследование индуктивной емкости диэлектриков (8) делается затруднительным вследствие двух мешающих явлений. Первое заключается в проводимости диэлектрика, которая, будучи во многих случаях исключительно малой, тем не менее не является совершенно неощутимой. Второе—явление, называемое электрической абсорбцией*) и состоящее в том, что когда диэлектрик подвергается воздействию электродвижущей силы, электрическое смещение постепенно увеличивается, а если электродвижущая сила устраняется, диэлектрик не возвращается моментально в свое первоначальное состояние, но разряжает только часть сообщенной ему электризации и, будучи предоставленным самому себе, постепенно приобретает электризацию

на своей поверхности, тогда как внутренность диэлектрика постепенно деполяризуется. Почти все твердые диэлектрики обнаруживают это явление, которое объясняет остаточный заряд лейденской банки и некоторые явления в электрических кабелях, описанных Ф. Дженкиным*).

(14) Мы встречаемся здесь с двумя другими родами податливости, отличными от упругости идеального диэлектрика, которую мы сравнивали с идеально упругим телом. Податливость, которая относится к проводимостям, можно сравнить с податливостью вязкой жидкости (иначе говоря, жидкости, имеющей большое внутреннее трение) или мягкого тела, в котором малейшая сила производит постоянное изменение формы, увеличивающееся вместе со временем действия силы. Податливость, связанная с явлением электрической абсорбции, может быть сравнена с податливостью упругого тела клеточной структуры, содержащего густую жидкость в своих полостях. Такое тело, будучи подвергнутым давлению, сжимается постепенно, а когда давление устраняется, тело не сразу принимает свою прежнюю форму, потому что упругость материи тела должна постепенно преодолеть вязкость жидкости, прежде чем восстановится полное равновесие. Некоторые твердые тела, хотя и не имеют той структуры, о которой мы говорили выше, обнаруживают механические свойства такого рода**), и вполне возможно, что эти же самые вещества в качестве диэлектриков обладают аналогичными электрическими свойствами, а если они являются магнитными веществами, то обладают соответствующими свойствами, относящимися к приобретению, удержанию и потере магнитной полярности.

*) F. J e n k i n, Reports of the British Association, 1859, стр. 248, а также Report of Committee of Board of Trade on Submarine Cables, стр. 136 и 464.

**) Как, например, состав из клея, патоки и т. п., из которого делают небольшие пластические фигурки, которые, будучи деформированы, лишь постепенно приобретают свои первоначальные очертания.

*) F a r a d a y, «Exp. Res.» (1233—1250) (см. русск. изд.).

(15) Поэтому кажется, что некоторые явления электричества и магнетизма приводят к тем же заключениям, как и оптические явления, а именно, что имеется эфирная среда, проникающая все тела и изменяемая только в некоторой степени их присутствием; что части этой среды обладают способностью быть приведенными в движение электрическими токами и магнитами; что это движение сообщается от одной части среды к другой при помощи сил, возникающих от связей этих частей; что под действием этих сил возникает определенное смещение, зависящее от упругости этих связей, и что вследствие этого энергия в среде может существовать в двух различных формах, одна из которых является актуальной энергией движения частей среды, а другая — потенциальной энергией, обусловленной связями частей в силу их упругости.

(16) Отсюда мы приходим к концепции сложного механизма, способного к обширному разнообразию движений, но в то же самое время связанного так, что движение одной части зависит согласно определенным отношениям от движения других частей причем эти движения сообщаются силами, возникающими из относительного смещения связанных между собой частей вследствие упругости связей. Такой механизм должен подчиняться общим законам динамики, и мы должны иметь возможность вывести все следствия этого движения, предполагая, что известна форма отношения между движениями частей⁽⁹⁾.

(17) Мы знаем, что когда электрический ток течет в проводящей цепи, прилегающая часть поля характеризуется известными магнитными свойствами, и если в поле находятся две цепи, магнитные свойства поля, относящиеся к обоим токам, комбинируются. Таким образом, каждая часть поля находится в связи с обоими токами, а оба тока связываются друг с другом в силу их связи с намагничиванием поля. Первым результатом этой связи, который я предлагаю изучить, является индукция одного тока другим и индукция вследствие движения проводников в поле.

Другим, вытекающим отсюда результатом является механическое взаимодействие между проводниками, по которым текут токи. Явление индукции токов было выведено из механического взаимодействия проводников Гельмгольцем^{*}) и Томсоном^{**}). Я следовал обратному порядку и вывел механическое взаимодействие из законов индукции. Я затем описал экспериментальные методы определения величин L , M , N , от которых зависят эти явления.

(18) Затем я прилагаю явления индукции и притяжения токов к исследованию электромагнитного поля и к установлению системы магнитных силовых линий, указывающих на их магнитные свойства. Исследуя то же самое поле при помощи магнита, я показываю распределение его эквипотенциальных магнитных поверхностей, пересекающих силовые линии под прямыми углами.

Чтобы ввести эти результаты в сферу символического исчисления, я выражаю их в форме общих уравнений электромагнитного поля.

Эти уравнения выражают:

(A) Соотношение между электрическим смещением, током истинной проводимости и полным током, составленным из обоих.

(B) Соотношение между магнитными силовыми линиями и коэффициентами индукции цепи, как они уже выведены из законов индукции.

(C) Соотношение между силой тока и его магнитными действиями в соответствии с электромагнитной системой единиц.

(D) Значение электродвижущей силы в каком-либо теле, возникающей от движения тела в поле, изменения самого поля и изменения электрического потенциала от одной части поля к другой.

(E) Соотношение между электрическим смещением и электродвижущей силой, которая его производит.

^{*}) См. сноску на стр. 80.

^{**}) W. Thomson, Reports of the British Association, 1848; Phil. Mag., декабрь 1851 г.

(F) Соотношение между электрическим током и производящей его электродвижущей силой.

(G) Соотношение между количеством свободного электричества в любой точке и электрическими смещениями в окрестности ее.

(H) Соотношение между увеличением или уменьшением свободного электричества и электрическими токами поблизости.

Всего таких уравнений имеется 20, содержащих 20 переменных величин.

(19) Затем я выражаю через эти величины внутреннюю энергию электромагнитного поля, как зависящую частично от магнитной и частично от электрической поляризации в каждой точке ⁽¹⁰⁾.

Отсюда я определяю действующую механическую силу, во-первых, на подвижный проводник, по которому течет электрический ток; во-вторых, — на магнитный полюс; в-третьих, — на наэлектризованное тело.

Последний результат, а именно механическая сила, действующая на наэлектризованное тело, дает начало независимому методу электрического измерения, основанному на электростатических действиях. Отношение между единицами, применяемыми в этих двух методах, оказывается зависящим от того, что я назвал «электрической упругостью» среды, и является скоростью, которая была экспериментально определена Вебером и Кольтраушем ⁽¹¹⁾.

Затем я показываю, как рассчитывать электростатическую емкость конденсатора и удельную индуктивную емкость диэлектрика ⁽¹²⁾.

Случай с конденсатором, состоящим из параллельных слоев веществ, обладающих различными электрическими сопротивлениями и индуктивными емкостями, изучается в дальнейшем и показывается, что именуемое электрической абсорбцией явление, вообще говоря, будет иметь место, т. е. если конденсатор будет внезапно разряжен, то через короткое время он обнаружит наличие *остаточного* заряда.

(20) Общие уравнения в дальнейшем применяются к случаю магнитного возмущения, распространяющегося через непроводящее поле, и показывается, что единственные возмущения, которые могут распространяться таким образом, это возмущения, поперечные к направлению распространения, и что скорость распространения является скоростью v , определенной экспериментальным путем из опытов, подобных опыту Вебера, которая выражает количество электростатических единиц электричества, содержащихся в одной электромагнитной единице.

Эта скорость так близка к скорости света, что, повидимому, мы имеем серьезные основания сделать заключение, что сам по себе свет (включая лучистую теплоту и другие излучения) является электромагнитным возмущением в форме волн, распространяющихся через электромагнитное поле согласно законам электромагнетизма. Если это так, то совпадение между упругостью среды, вычисленной, с одной стороны, из быстрых световых колебаний и, с другой стороны, найденной медленным процессом электрических экспериментов, показывает, как совершенны и правильны должны быть упругие свойства среды, если она не заполнена какой-либо материей, более плотной, чем воздух. Если тот же самый характер упругости сохраняется в плотных прозрачных телах, то оказывается, что квадрат показателя преломления равен произведению удельной диэлектрической емкости и удельной магнитной емкости. Проводящие среды быстро поглощают такие излучения и поэтому обычно являются непрозрачными.

Концепция распространения поперечных магнитных возмущений с исключением продольных определенно проводится профессором Фарадеем *) в его «Мыслях о лучевых вибрациях». Электромагнитная теория света в том виде, в каком она предложена им, является такой же по существу, как и та, которую я развиваю в настоящем докладе, за исключением того, что в 1846 г.

*) Phil. Mag., май 1846 г. или «Exp. Rev.», т. III.

не имелось данных для расчета скорости распространения ⁽¹³⁾.

(21) Общие уравнения затем применяются к расчету коэффициентов взаимной индукции двух круговых токов и коэффициента самоиндукции катушки.

Отсутствие равномерного распределения тока в различных частях сечения провода в момент начала течения тока, как я полагаю, исследуется впервые, и найдена соответствующая поправка для коэффициента самоиндукции.

Эти результаты применяются к расчету самоиндукции катушки, применяемой в опытах Комитета Британской ассоциации по стандартам электрического сопротивления, и полученные величины сравниваются с величинами, определенными опытным путем.



ЧАСТЬ II

ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Электромагнитное количество движения тока

(22) Мы можем начать с рассмотрения состояния поля вблизи электрического тока. Мы знаем, что в поле возбуждаются магнитные силы, направление и величина которых зависят согласно известным законам от формы проводника, несущего ток. Когда сила тока увеличивается, магнитные действия также увеличиваются в том же самом отношении. Если магнитное состояние поля зависит от движения среды, определенная сила должна быть приложена для того, чтобы увеличить или уменьшить эти движения, и если эти движения, будучи возбуждены, продолжаются, то связь между током и окружающим его электромагнитным полем заключается в том, что ток наделен известным количеством движения совершенно таким же образом, как связь между точкой передачи машины и маховиком наделает точку передачи добавочным количеством движения, которое может быть названо количеством движения маховика, приведенным к точке передачи ⁽¹⁴⁾. Неуравновешенная в машине сила, действующая на точку передачи, увеличивает это количество движения и может быть измерена степенью увеличения.

В случае электрических токов сопротивление внезапно возрастаню или уменьшению напряжения про-