

120 лет весьма быстрых колебаний

В. МЕРКУЛОВ, г. Москва

В декабре 1888 г. великий немецкий физик Генрих Рудольф Герц завершил основные эксперименты по открытию электромагнитных волн, названных позже радиоволнами. Указанную дату отмечают как одно из важнейших научно-технических событий в истории физики.

Измерения скорости света

Еще до нашей эры многим ученым в области естествознания и философии (в пору широких понятий, включавших в себя и физические знания) был известен ряд свойств света: прямолинейное расхождение лучей; отражение их от зеркала под углом, равным углу падения; преломление в воде; распространение существенно быстрее звука; феномен радуги в небе, объясняемый рассеянием большим числом капель воды, пропускающих через себя и отражающих солнечное сияние.

Первые измерить скорость света вознамерился в 1607 г. итальянский философ, механик и астроном Г. Галилей (1564—1642). Расставив ассистентов по холмам с зажженными и прикрытыми заслонками фонарями на расстоянии 1,5 км одного от другого, он попросил их поочередно как можно быстрее открывать заслонки, если они увидят свет от фонаря соседа. Себя Галилей озадачил определением времени прохождения световых отправлений вдоль цепи. Опыт был весьма наивный и потому безуспешный.

Элегантный и подлинно научный опыт измерения скорости света [1] поставил в 1675 г. датский астроном О. Ремер (1644—1710). К тому времени уже наблюдали спутники Юпитера, открытые Галилеем в 1609 г. Было известно, что спутник Ио попадает в тень планеты каждые 42,5 ч. Однако видимые с Земли начала затмений спутника Юпитером отличались от расчетных и зависели от положения Земли в космическом пространстве, чего, казалось, не должно было быть. Ошибка достигала 22 мин., когда Земля удалялась по своей орбите от Юпитера на максимальное расстояние. Ремер предположил, что ошибку вносит отраженный от небесного тела свет, распространяющийся с конечной скоростью. В то время параметры орбит Земли, Юпитера и его спутников не были точно известны, поэтому найденная скорость света получилась равной 222 000 км/с. Этим опытом Ремер опроверг доводы известных ученых древности и их последователей в средние века о бесконечно большой скорости света.

Английский физик и талантливый изобретатель Ч. Уитстон (1802—1875) в 1834 г. собрал установку для измерения скорости света в закрытом помещении, в которой задействовал три лейденские банки, служившие источниками световых разрядов. Перед ними он установил тонкое и легкое вращающееся зеркало. По сливающимся линиям от световых источников он определял получившее-

ся число оборотов отражателя, после чего рассчитывал скорость прохождения лучами света известного расстояния. В современной литературе сообщают о получении Уитстоном результата в 464 000 км/с.

Однако Уитстон более известен причастностью к знаменитому мосту, измеряющему электрическое сопротивление. Настоящий его изобретатель — английский ученый-исследователь земного магнетизма и математик С. Кристи (1784—1865), предложивший прибор в 1833 г. Уитстон прославился популяризацией и энергичным продвижением моста при построении телеграфа, в учебную и лабораторную практику.

Измерение скорости света в "наземных" условиях [1] на окраине Парижа было проведено французским физиком А. Физо (1813—1896) и его отцом в 1849 г. Источник света и отражательное зеркало установили на расстоянии 8,66 км друг от друга. Между ними поместили зубчатое колесо с 72 зубцами, модулирующими световой луч. По максимальной интенсивности светового излучения "на глаз" определяли скорость вращения механизма (25 с^{-1}). После этого рассчитывали интервалы следования отраженных проблесков. Пройденное лучом расстояние (17,32 км) разделили на время действия световой вспышки. Получили результат 312 000 км/с, близкий к современному значению с относительной погрешностью 4,072 %.

Следующим, пожелавшим в 1850 г. измерить скорость света, был также французский медик, физик и астроном Ж. Фуко (1819—1868), который повторил установку Физо, но заменил в ней зубчатое колесо на быстро вращающееся зеркало [1]. Оно позволило сократить до 20 м путь светового луча и проводить измерения в лабораторных условиях. Полученный в 1862 г. результат 298 000 км/с оказался заметно ближе к истинному значению с погрешностью в 0,6 %. В дополнение к вращающемуся отражателю Фуко поместил рядом с ним стеклянную трубку, заполненную водой, и показал характерное уменьшение скорости распространения света в другой среде.

В 1878 г. французский профессор физики М. Корню (1841—1902) решил продолжить опыты по измерению скорости света. Корню возвратился к зубчатому колесу Физо, в котором увеличил число зубцов до 200. Полученный им результат соответствовал 300 000 км/с (0,069 %).

В конце 1877 г. к особо точному измерению скорости света приступил американский морской офицер и инже-

нер А. Майкельсон (1852—1931), опубликовавший первый результат в апреле 1879 г. (300 092 км/с, 0,1 %). И дальнейшую свою жизнь он посвятил измерениям скорости света. За выполнение масштабных прецизионных работ ученый был удостоен Нобелевской премии в 1907 г. Последнее измерение им было предпринято в 1924 г. Завершилось оно в 1933 г., уже после его смерти [1]. Полученный результат на основе 2885 измерений равен 299 774 км/с (0,006157 %).

Современное значение скорости распространения света и электромагнитных волн в вакууме (фундаментальная физическая постоянная) равно 299 792 458 м/с.

Опыты со светом М. Фарадея

12 марта 1832 г. в британское Королевское общество (аналог Императорской Академии наук в России) М. Фарадей (1791—1867) направляет письмо-пророчество, озаглавленное "Новые воззрения, подлежащие в настоящее время хранению в запечатанном конверте в архивах Королевского общества" [2]. Обнаруженный и изученный лишь в 1938 г. документ содержит ясно-видение: "Я пришел к заключению, что на распространение магнитного воздействия требуется время, которое, очевидно, окажется весьма незначительным. Я полагаю также, что электрическая индукция распространяется точно таким же образом. Я полагаю, что распространение магнитных сил от магнитного полюса похоже на колебания взволнованной водной поверхности... По аналогии я считаю возможным применить теорию колебаний к распространению электрической индукции... В настоящее время, насколько мне известно, никто из ученых, кроме меня, не имеет подобных взглядов". Содержание письма Фарадей все же раскрывает позже, в 1845 г. в изданной 19-й серии своего научного дневника "Экспериментальные исследования по электричеству" [3, с. 50—52], а еще позднее, 15 апреля 1864 г., — в письме "Мысли о лучевых колебаниях" [3, с. 53—57].

К завершающим работам по определению родства света и электромагнитных сил Фарадей приступил в конце 1845 г. Считается, что в субботу 13 сентября того года он с помощником провел ключевой эксперимент, послуживший становлению и развитию электромагнитной теории света и невидимых быстрых колебаний. Опыт заключался в том, что между полюсами довольно мощного электромагнита поместили прямоугольный кусок особо чистого стекла, изготовленного по рецепту самого Фарадея. Ему было хорошо известно, что в стекле луч света преломляется и в значительной мере становится поляризованным. Когда по обмотке электромагнита пропустили электрический ток, наблюдали изменение положения плоскости поляризации света. Явление исчезало при выключении тока. В следующие месяцы Фарадей поставил еще ряд схожих опытов. В упомянутой выше 19-й серии трудов он описывает свои опыты и считает, что им доказана связь между светом и магнетизмом.

Немецкий математик, астроном и физик К. Ф. Гаусс (1777—1855) совместно с другим немецким физиком В. Э. Вебером (1804—1891) с 1832 г. разрабатывали систему единиц измерения СГС (сантиметр, грамм, секунда), в дальнейшем повсеместно действовавшую практически до 1960 г. (с 1889 г. параллельно с МКС — метр, килограмм, секунда), когда была принята международная система СИ. В некоторых областях науки система СГС действует и сейчас. Они предложили привести магнитные единицы к электрическим через скорость света. Для этого рассчитали заряд конденсатора (лейденской банки) в электрических и магнитных единицах и обнаружили, что их соотношение определяется скоростью света.

В 1846 г. Вебер указал на упорядоченное движение электрических зарядов в проводнике с большой скоростью. Десятью годами позже (1856 г.) он совместно с германским физиком Р. Г. Кольраушем провел экспериментальную проверку скорости перемещения зарядов в тонком металлическом проводе. Оказалось, что она близка (310 740 км/с) к скорости света.

Фарадей в указанном выше письме статье (1864 г.) ссылается на скорость распространения электричества в проводе по известным ему опытам Уитстона, измеренную незадолго до этого и примерно равную 190 000 миль/с (305 775 км/с). Работы, выполненные Вебером, Кольраушем, Уитстоном во второй половине XIX века, для ученого мира служили безусловным указанием на общность оптических, электрических и магнитных природных явлений.

Динамическая теория Максвелла

Будучи еще совсем молодым человеком в начале 1850-х годов, английский физик-теоретик Дж. К. Максвелл (1831—1879) приступил к изучению изданного лабораторного журнала Фарадея "Экспериментальные исследования по электричеству" (1831—1846). Впоследствии в предисловии к первому изданию своей наиболее важной работы "Трактат об электричестве и магнетизме" (1873 г.) Максвелл написал: "Прежде чем я начал изучать электричество, я решил не читать математических трудов по этому предмету до тех пор, пока я досконально не прочту фарадеевских "Экспериментальных исследований"; "для науки, возможно, пошло на пользу то, что Фарадей, владея в совершенстве основными понятиями пространства, времени и силы, не был профессиональным математиком"; "но тем самым он сохранил более широкую свободу для своей собственной работы, для согласования своих идей с открытыми им фактами и для выражения своих мыслей естественным, не техническим языком"; "главным образом в надежде сделать его идеи основой математической теории я и предпринял написание этого трактата"; "Я ограничился почти исключительно математическим изложением предмета" [3, с. 105—111].

С начала прошлого тысячелетия, и особенно в XVII—XIX веках, в европейских странах главенствовала теория дальнего действия или мгновенного дей-

ствия на расстоянии электрических и магнитных сил. На прочность ее позиций не оказывали влияния проводимые учеными измерения скорости света. В работах "Фарадеевы силовые линии" (1857 г.), "Динамическая теория электромагнитного поля" (1864 г.) и "Трактате..." Максвелл объявил, что "электромагнитные возмущения" распространяются с конечной скоростью света, ввел понятие "поле". Во введении к "Динамической теории..." разъяснил: "Электромагнитное поле — это та часть пространства, которая содержит и окружает тела, находящиеся в наэлектризованном или намагниченном состоянии"; теория, которую я предлагаю, может, таким образом, быть названа теорией электромагнитного поля" [3, с. 73]. Далее в 20-м параграфе [3, с. 78, 79] он пишет, что в поле "могут распространяться только те возмущения, которые являются поперечными по отношению к направлению распространения, и что скорость распространения так близка к скорости света, что мы имеем, по-видимому, серьезное основание сделать заключение, что и свет (включая лучистое тепло и различные другие излучения) является электромагнитным возмущением, имеющим форму волн, распространяющихся через электромагнитное поле согласно электромагнитным законам"; "Концепция распространения поперечных магнитных возмущений, с исключением возможности продольных возмущений, была отчетливо высказана профессором Фарадеем в его "Мыслях о лучевых колебаниях". Электромагнитная теория света, предложенная им, является по существу той же самой, которую я начал развивать".

Теорию электромагнитного поля и выражающие ее фундаментальные уравнения Максвелл разработал в 1860—1865 гг. В популярном виде они изложены в работах [2, 4]. Российский физик-теоретик Л. И. Мандельштам (1879—1944) во введении к [3, с. 24], подчеркивая основной момент теории и давая разъяснение 1-му уравнению, написал, что в математической теории Максвелла "закон индукции Фарадея выражается в терминах теории поля так, что быстрота изменения числа силовых магнитных линий, проходящих через контур, пропорциональна или, точнее говоря, определяет собой интеграл по контуру от возникающей при этом электродвижущей силы... Перенимая это в свою теорию, Максвелл делает следующий решительный шаг, принадлежащий всецело ему. Он постулирует взаимность между электрическим и магнитным полями, предполагая, что скорость изменения числа электрических силовых линий, пронизывающих поверхность замкнутого контура, порождает, в свою очередь, магнитодвижущую силу в контуре, интеграл от которого пропорционален скорости изменения во времени потока электрических линий, т. е. току смещения, который эквивалентен, таким образом, обычному току в проводниках". Или иначе можно сказать, что пересечение проводником электрических силовых линий с определенной скоростью порождает, в свою очередь, магнитодви-

жущую силу в контуре, пропорциональную скорости изменения во времени потока электрических линий, эквивалентную обычному току в проводниках.

Однако в работах Фарадея и Максвелла не встречаются термины "электромагнитная волна", "длины волн" света, определенные в 1801 г. англичанином Т. Юнгом (1773—1829), отсутствуют прямые указания на возможное наличие в природе других электромагнитных волн, отличающихся от световых числом колебаний в единицу времени. Формально говоря, Максвелл не предсказывал невидимых для глаз высокочастотных электромагнитных возмущений, распространяющихся в эфире со скоростью света. Его последователи теоретически провозглашали их существование как аксиому, хотя не понимали, для чего они понадобятся. Известное с 1832 г. явление самоиндукции, как частный случай электромагнитной индукции, Фарадеем было использовано в отдельных опытах, однако в его письменных работах упоминание термина отсутствует.

Трудно поверить, что одаренным ученым не была известна разработанная российским физиком Э. Х. Ленцем (1804—1865) еще в 1833 г. сверхгигантская теоретическая и практическая формула расчета ЭДС самоиндукции: $E = -L \cdot di/dt$. Также кажется невероятным, что они не были знакомы с резонансом и другой, выведенной физиком-ирландцем У. Томсоном (1824—1907) в 1853 г. не менее замечательной формулой: $T = 2\pi\sqrt{LC}$. Отметим, что именно явления самоиндукции, резонанса, указанные формулы послужили базой физическому направлению, получившему наименование "радиотехника" в XX веке.

В руководимой Максвеллом богатой оснащенной и известной Кавендишской лаборатории британского Кембриджского университета с момента создания в 1871 г. не было предпринято попыток по проверке положений открытой электродинамической теории. Однако известно, что Максвелл не находился в плену оторванного от жизни "чистого теоретизирования". Им выполнены некоторые работы прикладного характера, например, предложена методика получения цветных фотографий, придумано средство для удаления жировых пятен с одежды.

Максвелл не встречался с Фарадеем. Лишь в октябре 1861 г. он письменно оповестил его о важнейшем открытии, легшем в основу подготовляемой к изданию "Динамической теории электромагнитного поля": "свет состоит из поперечных волн той же самой среды, которая является причиной электрических и магнитных явлений". Фарадей в высшей степени одобрительно отнесся к сообщению, поддержал Максвелла.

Тайное становится явным

В конце XVIII — первой половине XIX веков больше всего успешных научных опытов было проведено во Франции. Во второй половине XIX века научным центром Европы начали считать Германию. Наиболее важные научно-технические материалы стали публиковать на немецком языке, вплоть до начала

второй мировой войны. Многие популяризаторы достижений науки даже провозглашали, что немцы все открыли и нечего уже изобретать.

Господствовавшая в европейских умах теория мгновенного действия (дальнодействия) объясняла, казалось бы, все физические процессы, связанные с электричеством и магнетизмом. Виднейшими учеными Германии было написано больше всего "глубоких" и "обоснованных" работ, математически поддерживающих теорию. В эту теорию никак не вписывались электродинамические постулаты Максвелла и его уравнения. Ведущий немецкий физик и физиолог Г. фон Гельмгольц (1821—1894) даже посмеивался над мудрецами из Англии — Максвеллом и Фарадеем.

Однако европейским физикам уже известно было о реализации на практике некоторых идей Фарадея. Отмахнуться от них было нельзя. В России академиком-электротехником Б. С. Якоби (1801—1874) совместно с Ленцем в 1838 г., в Италии физиком-электротехником А. Пачинотти (1841—1912) в 1860 г. были предложены электродвигатели, пригодные для эксплуатации. В Англии инженер-телеграфист К. Варлей (1828—1883) в 1866 г. и Уитстон в 1867 г., в Германии инженер-изобретатель В. фон Сименс (1816—1892) в том же 1867 г. разработали работоспособные генераторы электрического тока. Наряду с этим, ученые-физики публиковали материалы о наблюдениях ими быстрых электрических колебаний, возникающих, например, при разряде лейденских банок.

В 1826 г. впервые с заявлением о колебательном разряде конденсаторного накопителя электричества выступил французский физик Ф. Савари (1791—1841). Американский физик Дж. Генри (1797—1878) в 1842 г., а в 1847 г. и сам Гельмгольц инструментально также наблюдали затухающие с большой скоростью искровые колебания от лейденской банки. В 1857 г. германский физик В. Феддерсен (1832—1918) по методике исследований, заимствованной у англичанина Уитстона, изучая изображения совокупности искровых свечений, видимых во вращающемся зеркале, измерил период основного колебания, равный 5 мкс. Он дополнительно подтвердил "жизненность" выведенной Томсоном формулы периодичности колебаний в цепи, зависящих от значительной индуктивности и емкости. Проведенные эксперименты показали, что от изобретенной немцем Г. Румкорфом (1803—1877) высоковольтной катушки (1851 г.) возможно получение еще более быстрых колебательных разрядов.

Результаты опытов косвенно подтверждали высказанные Максвеллом предположения о наличии электромагнитных возмущений, по длине волны отличающихся от световых, но имеющих одинаковую природу и скорость распространения. Под напором доказательств Гельмгольц разработал компромиссную и, как показало будущее, надуманную теорию двойственности электрических сил — электродинамических, передающихся со скоростью света, и электростатических, воздействующих на заряженные тела безынерционно (мгновенно).

В 1879 г. Гельмгольц обратил внимание своего лучшего ученика Г. Р. Герца (1857—1894) на конкурсную работу Прусской Академии наук, посвященную "экспериментальному доказательству наличия какой-либо связи между электродинамическими силами и диэлектрической поляризацией изоляторов" [3, с. 112]. Получение положительного или

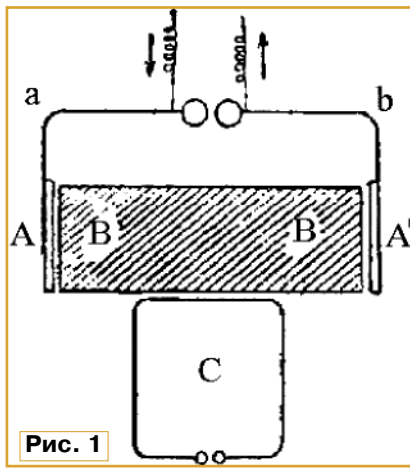


Рис. 1

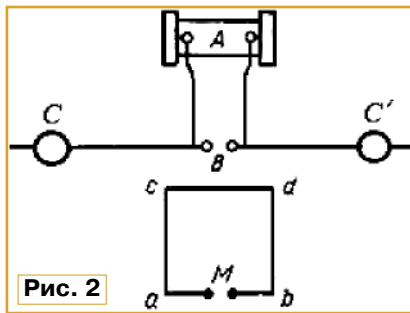


Рис. 2

отрицательного результата по существу означало бы признание или опровержение электродинамической теории Максвелла—Фарадея. Герц провел вычислительные необходимые для эксперимента частоты колебаний и решил, что в опыте вряд ли получится выраженный эффект при использовании имевшихся у него лейденской банки и индукционного возбуждителя. Задача ему запомнилась, но приступить к ее разрешению он сумел лишь осенью 1886 г., будучи экстраординарным профессором Высшей политехнической школы в Карлсруэ (Германия, земля Баден-Вюртемберг).

Позже, в 1891 г., в сборнике своих статей под общим названием "Исследования по распространению электрической силы", во вступительном обзоре [3, с. 112—130], Герц написал, что в лаборатории заведения его привлекли катушки индуктивности, способные вырабатывать искровой разряд от коммутации с небольшими лейденскими банками или гальваническими батареями. Увидев "бурные" и регулярные электрические колебания, он счел их подходящими для решения задачи Прусской Академии.

Герц отметил "еще одно особое и неожиданное свойство электрической искры, которое не предусматривалось никакой теорией". Благодаря искровым вспышкам возбуждались еще невидимые "электрические движения, более

быстрые, чем те, которыми физики предполагали до тех пор". Герц "даже сомневался в течение некоторого времени, не имеет ли перед собой совершенно новую форму электрического дальнодействия". Его изумило, что стеклянная пластина, в обычных условиях хорошо пропускавшая световые лучи, будучи помещенной между искробразующими электродами, прерывала их образование.

Однако в опыте по схеме, показанной на рис. 1, истечение искровых вспышек между концами вторичного проводника в контуре С происходило независимо от отсутствия или наличия изолятора В (из серы или парафина) между пластинами АА'. Попутно выяснилось, что на искробразование оказывает влияние ультрафиолетовое излучение: число искр заметно уменьшалось в затемненной комнате или при расположении всей установки в светонепроницаемом футляре. Особенно Герца смущала "передача" световых проблесков по мере все большего удаления контура С от пластин АА'. Даже на расстоянии 12 м ему удавалось видеть искры во вторичной цепи.

В отличие от установившихся взглядов, что волны локализируются и перемещаются внутри проводника, Герц видел, что они распространяются еще и в окружающем пространстве. "Утверждение о том, что электрические силы могут существовать независимо от своих зарядов, находилось в прямом противоречии с господствовавшими теориями электричества". Эксперименты показали, что по воздуху волны распространяются с такой же скоростью, как и вдоль проволоки. Постепенно ему пришлось уяснить, "что здесь вообще следует соблюдать чрезвычайную осторожность при применении общих понятий и положений, проистекающих из обычного учения об электричестве".

В 1887—1888 гг. в лабораторных условиях Герц формулирует методические задания по проверке гипотез Максвелла—Фарадея, разрабатывает и делает для них устройства, отражатели, экраны, изучает особенности поведения и распространения открытых им электромагнитных высокочастотных колебаний. В сериях опытов и тестов проводит тысячи наблюдений и измерений миллиметровых по длине волн искровых разрядов. Во всех установках и устройствах он применяет большую генераторную катушку Румкорфа длиной 52 см и диаметром 20 см с ртутным прерывателем.

Наиболее известная печатная (1887 г.) его работа "О весьма быстрых электрических колебаниях" [3, с. 131—148] посвящена в основном исследованиям резонанса. В устройстве, схема которого изображена на рис. 2, выход высоковольтного генератора А нагружен на горизонтальную первичную цепь СВС' длиной 2,6 м, состоящую из двух прямых медных кусков проволоки диаметром 5 мм с насаженными на концах цинковыми пыльными шариками С и С' диаметром 30 см. Во вторичной цепи, имеющей форму окружности диаметром 1 м или квадрата со сторонами длиной 75 см, применен провод диаметром 2 мм. Явление резонанса Герц проверял в различных симметричных положениях шаров С и С' на проволоке при удалении линейного

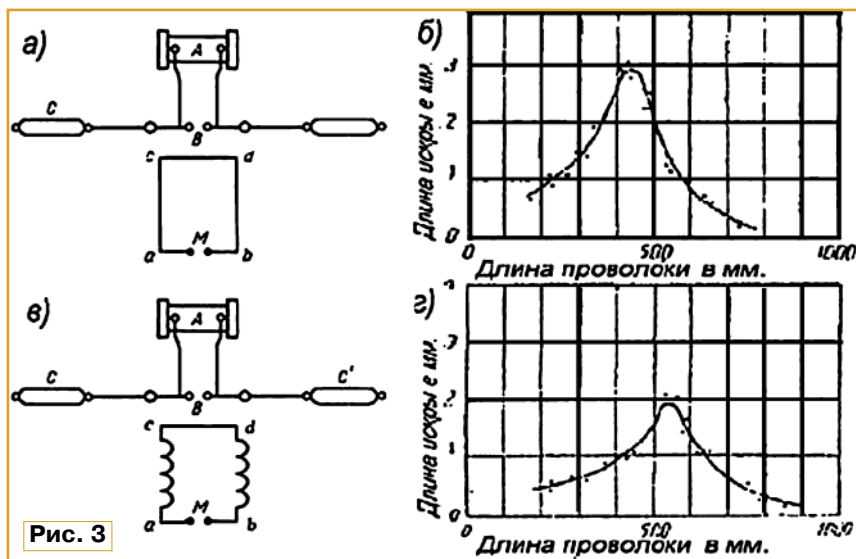


Рис. 3

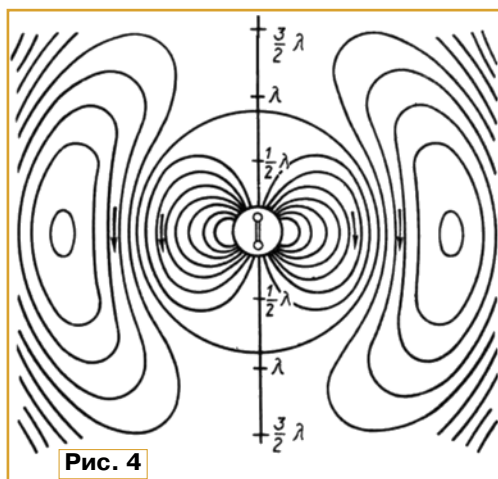


Рис. 4

излучателя от вторичного контура на 30...50 см. Индикацию он проводил по длине искры во вторичной цепи. Ярко выраженный резонанс проявился при неизменной длине первичной цепи, нагруженной на концах прямоугольниками из медного провода с сохранением постоянного размера в 30 см сторон ab и cd (рис. 3,а). Впервые в мире вычерченная резонансная кривая для ВЧ показана на рис. 3,б. Вместо проводников ac и bd Герц включает и катушки индуктивности, намотанные из одинаковых медных проводов диаметром 2 мм и той же длиной 10...250 см (рис. 3,в). Получилась немного сглаженная резонансная кривая (рис. 3,г).

В 1888 г. на установке с большим параболическим зеркалом с наружными размерами $2 \times 1,2$ м, глубиной 0,7 м (изготовленным из цинкового листа) и фокусным расстоянием 12,5 см Герц проводил эксперименты по изучению прямолинейного распространения, отражения, поляризации и преломления коротких электромагнитных волн длиной около 50 см (600 МГц). Он стремился показать тождественность электромагнитных и световых волн и окончательно доказать актуаль-

ность теории Максвелла—Фарадея. Первичная цепь (диполь) представляла собой две вытянутые в линию медные проволоки длиной по 50 см и диаметром 5 мм. Диполь помещали вертикально в середине фокальной линии. Вторичной цепью служил кольцевой контур диаметром 15 см, изготовленный также из медного провода диаметром 1 мм. Отчет о выполненной работе [3, с. 183—192] под названием "О лучах электрической силы" 12 декабря 1888 г. был представлен Гельмгольцу. На другой день, в четверг 13 декабря, с изложением материала Герц выступил в Берлине на научной конференции Прусской Академии наук [5].

К разработке уравнений Максвелла, собственному пониманию их математического и физического смысла Герц обратился (1889 г.) в теоретической статье "Силы электрических колебаний, рассматриваемые с точки зрения теории Максвелла" [3, с. 166—182]. В иллюстрациях к статье он представил образное видение линий распространения электромагнитных волн от изобретенного им диполя, т. е. перпендикулярно излучателю (рис. 4).

ЛИТЕРАТУРА

1. Джефф Б. Майкельсон и скорость света. — М.: ИИЛ, 1963. Web-версия: <<http://n-t.ru/ri/dj/mc.htm>>.
2. Карцев В. Приключения великих уравнений. — М.: Знание, 1986. Web-версия: <<http://n-t.ru/ri/kr/pu22.htm>>.
3. Из предыстории радио. Сборник оригинальных статей и материалов. Вып. 1, под ред. Л. И. Мандельштама. — М.—Л.: изд-во АН СССР, 1948. Web-версия: <<http://lib.mexmat.ru/books/8553>>.
4. Кудрявцев П. Курс истории физики. — М.: Просвещение, 1982. Web-версия: <<http://historic.ru/books/item/f00/s00/z0000027/index.shtml>>.
5. Heinrich Hertz — Commemorative Essays on the 100th Anniversary of His Pioneering Experiments on Electromagnetic Waves. — Heinrich-Hertz-Institut, Berlin, 1988.

Редактор — А. Михайлов,
иллюстрации предоставлены автором