

М.И. Баранов

АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 12: КЛАССИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Наведено короткий нарис з усесвітньої історії розвитку в 18-20 століттях класичної електродинаміки.

Приведен краткий очерк из всемирной истории развития в 18-20 веках классической электродинамики.

1. КРАТКИЙ ПЕРЕЧЕНЬ ОТКРЫТЫХ ЗАКОНОВ И СОЗДАНЫХ ИЗОБРЕТЕНИЙ К СЕРЕДИНЕ 19-го ВЕКА В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

К середине 19-го столетия учеными-физиками мира было открыто немало законов и накоплено большое количество экспериментальных фактов, связанных с природными (искусственными) электрическими и магнитными явлениями [1, 2]. Так, согласно данным [1, 2] в 1729 году С. Грэйем была открыта **электростатическая индукция** и установлено **явление электропроводности физических тел**. В 1733 году Ш. Дюфе ввел физические понятия **двух родов электричества**. В 1745 году П. Мушенбруком был построен первый накопитель электричества – **электрический конденсатор** ("лейденская банка"). В 1750 году Б. Франклином были введены понятия "**положительного**" и "**отрицательного**" вида **электричества**, создана описательная **унитарная теория электричества** и был сформулирован **закон сохранения электрического заряда**, подтвержденный опытным путем в 1843 году М. Фарадеем, об фундаментальных результатах многочисленных экспериментальных исследований которого в области физики было подробно изложено в [3]. В 1785 году Ш. Кулоном был установлен основной **закон взаимодействия неподвижных точечных электрических зарядов**. Далее в 1786 году Л. Гальвани открыл **постоянный электрический ток**. В 1800 году А. Вольта создал первый длительно работающий **источник постоянного электрического тока**. В 1820 году Х. Эрстед открыл **наличие у металлического проводника с электрическим током внешнего магнитного поля** и тем самым положил начало такому разделу физики как **электромагнетизм**. В том же 1820 году А. Ампер (рис. 1) сформулировал закон взаимодействия электрических токов (**закон Ампера**), что фактически и привело к возникновению в классической физике ее нового раздела – **электродинамики** [1, 2].

Кроме того, в 1820 году А. Ампером была разработана **теория магнетизма**, в соответствии с которой любые магнитные взаимодействия тел сводятся к взаимодействию скрытых в этих телах круговых молекулярных токов, каждый из которых эквивалентен плоскому магниту (**теорема Ампера**) [1]. Этот великий физик доказательно указывал на тесную взаимосвязь между электрическими и магнитными явлениями. Он активно проводил в электрофизическую практику токовую идею происхождения магнетизма. В 1822 году им был открыт **магнитный эффект катушки** с постоянным электрическим током, что дало возможность вскоре создать **первый спиральный многовитковый соленоид** с электрическим током.



Рис. 1. Выдающийся французский физик Андре Ампер (1775-1836 гг.), ставший одним из основоположников классической электродинамики

Он показал эквивалентность этого соленоида с током постоянному магниту и выдвинул идею усиления постоянного магнитного поля соленоида при помощи размещения внутри него железного сердечника из мягкого железа [1]. Отметим, что именно А. Ампер предложил в 1820 году использовать электромагнитные явления для передачи на расстояние электрических сигналов. На основе этой физико-технической идеи им в 1829 году был изобретен **электромагнитный телеграф** [1]. В уже не раз указанном 1820 году для магнитного поля металлического проводника с электрическим током был установлен **закон Био-Савара-Лапласа**. В 1826 году выдающимся немецким ученым-физиком Георгом Омом (рис. 2), долгие годы проработавшим школьным учителем физики и математики, экспериментальным путем было сделано важнейшее научное открытие в области электричества – знаменитый закон, устанавливающий связь между силой электрического тока I , электрическим напряжением U и электрическим сопротивлением R цепи (**закон Ома**) [1].



Рис. 2. Выдающийся немецкий электрофизик Георг Ом (1787-1854 гг.), заложивший научные основы теоретической электротехники

© Баранов М.И.

В 1830 году известный немецкий ученый Карл Гаусс (1777-1855 гг.) сформулировал **основную теорему электростатики**, согласно которой поток вектора электрической индукции D через замкнутую поверхность S прямо пропорционален полному свободному электрическому заряду Q , заключенному внутри объема вещества, охватываемого указанной замкнутой поверхностью S (**теорема Гаусса**) [1, 2].

В 1831 году великим английским физиком М. Фарадеем (1791-1867 гг.) экспериментально было открыто фундаментальное **явление электромагнитной индукции**, связанное с возникновением электродвижущей силы в проводящем электрическом контуре при изменении магнитного потока через площадь, ограниченную этим контуром. О данном явлении, на котором базируется вся прикладная электротехника и электроэнергетика, автором было развернуто указано ранее в [3]. В 1833 году Э. Ленцем, первым экспериментально исследовавшим в России индукционные электрические токи в металлических проводниках и выполненных из них многовитковых катушках, было открыто знаменитое **"правило Ленца"**. В 1833 году М. Фарадеем были открыты основные законы электролиза, а в 1837 году им была обнаружена **поляризация диэлектриков**, обуславливающая влияние диэлектрика на электрическую емкость конденсатора [1, 2]. В 1832 году И. Пикси построил первый **генератор переменного тока**, использующий принцип электромагнитной индукции. В этот же период М. Фарадей в своих *"Новых воззрениях, подлежащих в настоящее время хранению в архивах Королевского общества"* [1, 3], обнаруженных лишь в 1938 году, высказал гениальную мысль о распространении электрического и магнитного действия в виде колебаний через промежуточную среду (фактически предсказал **существование электромагнитных волн**) и ввел новое физическое понятие – **понятие диэлектрической проницаемости ϵ** среды. В 1834 году Б. Якоби построил в России первый практический электромотор постоянного тока – **электродвигатель с вращающимся валом**. В этом же году М. Фарадей **постулировал существование ионов** и сконструировал **вольтметр**. В 1842 году усилиями Дж. Джоуля и Э. Ленца был открыт **закон теплового действия на проводник электрического тока**. В 1845 году В. Вебер установил **закон взаимодействия двух движущихся электрических зарядов**, а Г. Кирхгоф определил **закономерности в распределении электрического тока в разветвленных цепях** [1, 2]. В 1845 году М. Фарадей открыл магнитное вращение плоскости поляризации дневного света (**эффект Фарадея**). В 1851 году Г. Румкорф создал первую индукционную катушку – высоковольтный электрический трансформатор (**катушку Румкорфа**). В 1848 году В. Вебер построил первый электродинамометр. В 1852 году М. Фарадей отчетливо сформулировал в физике **фундаментальную концепцию поля**, хотя само понятие поля им было введено еще в 30-х годах 19-го столетия. В 1853 году У. Томсон развил **теорию электрических колебаний в электрической цепи**, содержащей конденсатор и катушку, и получил знаменитую формулу для периода T собственных колебаний электрического

тока в зависимости от величины емкости C и индуктивности L цепи: $T=2\pi(LC)^{1/2}$. В 1854 году Л. Фуко обнаружил нагревание сплошного металлического тела, находящегося в переменном электрическом поле. Этот **физический эффект нагрева проводника переменным электрическим полем** он объяснил возбуждением в нем (этом проводнике) индукционных электрических токов, названных впоследствии учеными **"токами Фуко"**. Для уменьшения данных электрических токов в сплошных телах им был предложен простой и надежный технический способ – разделение этих тел на отдельные части. В 1856 году У. Томсон обнаружил изменение электропроводности металлов под действием внешнего магнитного поля (**явление магнетосопротивления**), а точные количественные измерения магнетосопротивления были выполнены в 1866 году В. Беетцем, экспериментально подтвердившим рост электросопротивления металла в продольном внешнем магнитном поле [1]. В 1859 году Ю. Плюккером были открыты **катодные лучи в электроразрядной трубке** [1, 2]. Вот тот весьма неполный перечень сделанных мировым сообществом ученых-первопроходцев основных научных открытий и технических изобретений к середине 19-го века в области теории и практики электричества, который со стороны ведущих электрофизиков мира остро нуждался в их осмыслении, обобщении и объединении в единую научную систему электрофизических знаний.

2. СОЗДАНИЕ НОВОЙ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

Ведущими европейскими учеными (например, А. Ампером, В. Вебером, Ф. Нейманом и др.) в 19-ом столетии предпринимались многократные попытки создания теории электродинамических взаимодействий между физическими телами с электрическим током на основе ньютоновской "концепции дальнего действия" (мгновенного действия на расстоянии одного тела на другое без промежуточной среды), приводящие к появлению в рассматриваемой системе физических тел электродинамических сил, противоречащих третьему закону Ньютона [1]. Здесь, по мнению автора, попутно следует заметить и о том, что попытки применения различными учеными ньютоновской механики к объяснению в физике оптических явлений также оказались малоуспешными. При этом оказалось невозможным построить картину сил, действующих в пространстве между весомой материей и невесомым всепроникающим эфиром, являвшимся в волновой теории света того времени, появившейся почти одновременно с корпускулярной теорией света, носителем волнового движения.

За создание общей теории электромагнитных процессов во второй половине 19-го века активно взялся талантливый английский физик Дж. Максвелл (рис. 3), разработавший за период 1860-1865 гг. на основе новых физических идей **теорию электромагнитного поля**, ставшую научной основой современной теории электромагнетизма, базирующейся на классических принципах физики [1-4]. Здесь необходимо подчеркнуть то, что именно из высоко развитых интуитивных наглядных представлений от 1834 года современника физика-теоретика Дж. Максвелла и

великого физика-экспериментатора прошлых лет М. Фарадея о силовых магнитных линиях выкристаллизовалось **понятие поля**, имеющее фундаментальное значение для современной физики [5]. По мнению выдающегося немецкого (американского) физика-теоретика Альберта Эйнштейна (1879-1955 гг.) **физическая идея поля** М. Фарадея является самым важным научным открытием в мировой науке со времен выдающихся научно-технических достижений в механике и физике гениального английского ученого-универсала Исаака Ньютона (1643-1727 гг.) [1]. Использование идеи поля в науке "разорвало" схоластические рамки чисто механического описания явлений природы. В представлениях И. Ньютона и его научных последователей окружающее пространство являлось пассивным вместилищем материи: физических тел, молекул, атомов и электрических зарядов.



Рис. 3. Выдающийся английский физик Джеймс Максвелл (1831–1879 гг.), ставший основоположником новой теории электромагнетизма

В представлениях же М. Фарадея данное пространство должно было принимать непосредственное участие в протекающих в нем механических, электрических и магнитных явлениях. Приведем ниже слова выдающегося российского физика-теоретика, академика АН СССР Игоря Евгеньевича Тамма (1895-1971 гг.), касающиеся рассматриваемой идеи М. Фарадея [1, 5]: *"Созданное Фарадеем в противовес господствующим теориям дальнего действия представление о силовых линиях полностью оправдало себя на деле: оно оказалось верным руководителем Фарадея на пути его многочисленных блестящих открытий"*. С 1865 года материя стала выступать не только в виде вещества, а и виде поля. Полю физики стали придавать смысл объективной физической реальности [1, 2].

В разработанной Дж. Максвеллом **теории электромагнитного поля** электромагнитные явления стали подчиняться пространственно-временным закономерностям. Вся совокупность этих закономерностей классической электродинамики со временем (к 1890 году с учетом дальнейших теоретических предложений и дополнений в эту теорию выдающегося немецкого физика Генриха Герца (1857-1894 гг.) и выдающегося английского физика Оливера Хевисайда (1850-1925 гг.) [4]) в системе СИ стала подчиняться для покоящихся сред следующей широко известной классической системе фундаментальных уравнений Максвелла [6, 7]:

$$\operatorname{rot}\mathbf{H}=\gamma\mathbf{E}+\partial\mathbf{D}/\partial t; \quad (1)$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{E}=-\partial\mathbf{B}/\partial t; \quad (2)$$

$$\operatorname{div}\mathbf{B}=0; \quad (3)$$

$$\operatorname{div}\mathbf{D}=\rho; \quad (4)$$

где \mathbf{E} , \mathbf{H} – соответственно векторы напряженностей электрического и магнитного полей; $\mathbf{D}=\varepsilon\mathbf{E}$, $\mathbf{B}=\mu\mathbf{H}$ – соответственно векторы электрической и магнитной индукции; γ , ε , μ – соответственно удельная электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемости материала среды, в которой распространяется электромагнитное поле; ρ – объемная плотность свободного электрического заряда среды; t – текущее время.

Уравнение (1), обычно называемое первым уравнением Максвелла, является обобщением закона Ампера для переменного поля и свидетельствует о возбуждении магнитного поля электрическим током проводимости и переменным электрическим полем. В этом уравнении содержится оригинальная физическая идея Дж. Максвелла – к электрическому току, обусловленному переносом электрического заряда (первое слагаемое в правой части уравнения), он добавил так называемый ток смещения (второе слагаемое в правой части уравнения), вызываемый переменным электрическим полем. Уравнение (2), являющееся вторым уравнением Максвелла, вытекает из математической формулировки закона электромагнитной индукции Фарадея. Уравнение (3), выступающее в качестве третьего уравнения Максвелла, отражает отсутствие в природе магнитных зарядов и соответственно подчеркивает непрерывность магнитных силовых линий (линий индукции магнитного поля). Уравнение (4), ставшее четвертым уравнением Максвелла, соответствует известной электростатической теореме Гаусса, свидетельствует о прерывности силовых линий напряженности электрического поля, обобщает знаменитый закон Кулона для электрических зарядов и подчеркивает присутствие в природе этих зарядов. В итоге Дж. Максвеллу удалось построить замкнутую систему дифференциальных уравнений для напряженностей электрического и магнитного полей, переставших теперь быть несвязанными друг с другом. С этого времени эти поля предстали в физике в качестве единого и целого электромагнитного поля. Полученные Дж. Максвеллом уравнения (1)–(4) указывали на то, что электромагнитное поле может распространяться в свободном пространстве в виде **поперечных электромагнитных волн** (к этой новой физической идее он пришел независимо от М. Фарадея в 1864 году [1, 4, 7]). Так исторически ньютоновская "концепция дальнего действия" уступила место **максвелловской "концепции ближнего действия"**, согласно которой взаимодействия физических тел в пространстве происходят благодаря полям, распространяющимся с конечной скоростью. В своем завершенном виде теория электрических и магнитных явлений, изложенная Дж. Максвеллом на основе представлений об электромагнитном поле, была опубликована ее автором в 1873 году в фундаментальной книге *"Трактат об электричестве и магнетизме"* [1, 8]. Созданной новой теорией электромагнетизма для неподвижных сред выдающийся английский физик Дж. Максвелл навеки обессмертил свое имя в истории

всемирной науки.

Из уравнений Максвелла вытекало, что световое излучение (обычный дневной свет) можно рассматривать как распространение электромагнитного возмущения (к этой новой физической идее Дж. Максвелл пришел в 1861 году [1, 3]). Его указанные выше новые физические идеи, касающиеся тока смещения в веществе, существования в свободном пространстве электромагнитных волн и электромагнитной природы света, оказались настолько необычными и по сути научно-революционными, что ученые-современники Дж. Максвелла были ими просто обескуражены и шокированы. Из-за этого они их сразу не приняли и многие годы относились к новой теории электромагнитного поля настороженно и с подозрением.

Экспериментальные исследования выдающегося немецкого физика Г. Герца на созданной им высоковольтной электроустановке (рис. 4), генерирующей высокочастотные электрические колебания частотой до 100 МГц в открытой первичной RLC -цепи (вibrаторе Герца [1, 4]), позволили ему в 1888 году получать и надежно регистрировать с помощью открытого вторичного электрического контура (резонатора Герца [1, 4]) в воздушном пространстве его лабораторного помещения **электромагнитные волны** метрового диапазона [2]. Проведенное Г. Герцем длительное и тщательное опытное изучение этих электромагнитных волн радиодиапазона (установление их свойств поперечности, показателей отражения, преломления, поляризации и определение скорости их распространения в воздухе) позволило ему констатировать физическую тождественность полученных им электромагнитных волн световым. Выдающиеся научные результаты талантливого немца Г. Герца явились экспериментальным доказательством справедливости теории электромагнитного поля, разработанной ранее одаренным от природы англичанином Дж. Максвеллом.



Рис. 4. Внешний вид уникальных элементов высоковольтной электроустановки Г. Герца для получения им в 1888 году в лабораторных условиях электромагнитных волн [2]

Отметим, что указанные результаты исследований Г. Герца позволили также на базе воздушного вибратора Герца заложить научно-технические основы в области радиотехники для будущего практического осуществления в массовом масштабе при по-

мощи искровых радиостанций генерирования электромагнитных волн частотного радиодиапазона [5].

Другим серьезным аргументом в пользу достоверности теории электромагнитного поля Максвелла для неподвижных сред явились экспериментальные данные от 1899 года выдающегося российского физика Петра Николаевича Лебедева (1866-1912 гг.), касающиеся измерения им **давления света на твердые тела** [1, 2]. Согласно данным из [2] до рассматриваемой теории электромагнетизма Максвелла физическая реальность окружающего нас мира описывалась учеными как движение материальных точек при помощи обыкновенных дифференциальных уравнений классической механики. После создания теории электромагнитного поля Максвелла эта физическая реальность ученым представлялась уже в виде совокупности непрерывных полей, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных. Эта электромагнитная теория привела к глубоким превращениям и изменениям в самом основании (фундаменте) классической физики со времен великого ученого средневековья И. Ньютона [2]. В связи с этим принципиальным моментом в физических взглядах ученых выдающийся физик-теоретик 20-го столетия А. Эйнштейн в свое время сказал следующее [2]: "*Формулировка максвелловских уравнений явилась чрезвычайно важным событием не только благодаря ценности их содержания, но и потому, что они дали образец нового типа законов*".

Можно говорить о том, что классическая электродинамика, зародившаяся в "золотом" для электричества 19-ом веке, стала той первой областью научных знаний людей, где физиками при описании макроскопических электромагнитных процессов в веществе были впервые использованы **полевые физические взгляды и концепции**, получившие в настоящее время во многих областях науки и техники широкое распространение и физико-техническое применение.

3. ПОСЛЕДУЮЩИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ

К 1909 году выдающийся нидерландский физик-теоретик Хендрик Лоренц (1853-1928 гг.) обобщил макроскопические уравнения электромагнитного поля Максвелла, относящиеся к неподвижным физическим телам, и экстраполировал их на микроскопические электромагнитные поля, создаваемые отдельными заряженными микрочастицами вещества [1, 2]. Результатом такого обобщения в период 1880-1909 гг. стало создание Х. Лоренцем **классической электронной теории**, описывающей электрические, магнитные и оптические свойства вещества и протекающие в нем электромагнитные явления на основе анализа движения дискретных электрических зарядов (**уравнения Лоренца-Максвелла**). Данную электронную теорию Х. Лоренц использовал для разработки **электродинамики движущихся сред**, базирующейся на синтезе классической теории электромагнитного поля Максвелла для неподвижных сред и классической электронной теории, учитывающей движение исследуемых сред. С помощью этой теории Х. Лоренц получил известное выражение для **электродинамической си-**

лы, действующей на движущийся электрический заряд в электромагнитном поле, а также объяснил зависимость электропроводности вещества от его теплопроводности и развил *теорию дисперсии света* [1, 2]. Кроме того, благодаря указанной теории Х. Лоренц научно предсказал явление расщепления спектральных линий вещества в сильном магнитном поле. После того, как выдающийся нидерландский физик-экспериментатор Питер Зеeman (1865-1943 гг.) в 1896 году открыл явление расщепления спектральных линий в магнитном поле (*эффект Зеемана*) Х. Лоренцем на основе упомянутой электронной теории уже в 1897 году была разработана теория этого физического эффекта. Важно отметить, что в 1902 году П. Зеeman и Х. Лоренц за исследование влияния магнетизма на процессы излучения были удостоены Нобелевской премии по физике [1, 2]. Здесь следует указать, что в 1904 году Х. Лоренц при разработке электродинамики движущихся тел получил аналитические зависимости, связывающие между собой пространственные координаты и моменты времени одного и того же события в двух различных инерциальных системах отсчета (*преобразования Лоренца*), а также вывел формулу зависимости массы электрона от его скорости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подытоживая в этом весьма коротком научно-историческом очерке, посвященном известным научно-техническим событиям в области классической электродинамики, можно заключить, что:

1. В начале 20-го столетия активными творческими усилиями многих выдающихся физиков-теоретиков и физиков-экспериментаторов была создана электродинамическая картина окружающего нас сложного мира, описываемая теориями классической электродинамики.

2. На основе новой теории электромагнетизма – классической теории электромагнитного поля Максвелла, разработанной во второй половине 19-го века для неподвижных физических тел (для электродинамики покоящихся сред), к началу 20-го столетия была создана усовершенствованная теория электромагнитного поля Лоренца, справедливая для движущихся физических тел (для электродинамики движущихся сред).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрявцев П.С. Курс истории физики. – М.: Просвещение, 1974. – 312 с.
2. Храмов Ю.А. История физики. – Киев: Феникс, 2006. – 1176 с.
3. Баранов М.И. Майкл Фарадей и его научные заслуги перед человечеством // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – № 6. – С. 3-12.
4. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2008. – 252 с.
5. Тамм И.Е. Собрание научных трудов. Том 2. – М.: Наука, 1975. – С. 330-333.
6. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
7. Максвелл Дж.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. – М.: Гостехиздат, 1954. – 687 с.
8. Maxwell J.C. A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. I-II, Clarendon Press, Oxford, 1873. –1011 p.

Bibliography (transliterated): 1. Kudryavtsev P.S. Kurs istorii fiziki. – M.: Prosveschenie, 1974. – 312 s. 2. Hramov Yu.A. Istoriya fiziki. – Kiev: Feniks, 2006. – 1176 s. 3. Baranov M.I. Majkl Faradej i ego nauchnye zaslugi pered chelovechestvom // Elektrotehnika i elektromehhanika. – 2009. – № 6. – S. 3-12. 4. Baranov M.I. Izbrannye voprosy `elektrofiziki: Monografiya v 2-h tomah. Tom 1: `Elektrofizika i vydavuschiesya fiziki mira.–Har'kov: Izd-vo NTU "HPI",2008.–252 s. 5. Tamm I.E. Sbranie nauchnyh trudov. Tom 2. – M.: Nauka, 1975. – S. 330-333. 6. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki / Otv. red. V.K. Tartakovskij. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 864 s. 7. Maksvell Dzh.K. Izbrannye sochineniya po teorii `elektromagnitnogo polya. – M.: Gostehizdat, 1954. – 687 s. 8. Maxwell J.C. A Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. I-II, Clarendon Press, Oxford, 1873. -1011 p.

Поступила 29.08.2011

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.
НИПКИ "Молния"
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47
Тел. (057) 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Baranov M.I.

An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 12: classical electrodynamics.

A brief scientific essay on the history of classical electrodynamics development in the 18th through 20th centuries is given.

Key words – history, essay, classical electrodynamics.