

## ДЖЕЙМС КЛЕРК МАКСВЕЛЛ І ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Баранов М.И., д.т.н.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета

"Харьковский политехнический институт"

Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"

тел. (0572) 707-68-41, Факс (0572) 707-61-33, E-mail: nipkimolniya@kpi.kharkov.ua

*Наведено короткий нарис з всесвітньої історії електромагнетизму, який пов'язане з тріумфом фізичних ідей Фарадея і створенням Максвеллом на їх основі теорії електромагнітного поля.*

*Приведен краткий очерк из всемирной истории электромагнетизма, связанный с триумфом физических идей Фарадея и созданием Максвеллом на их основе теории электромагнитного поля.*

*175-летию со дня рождения  
Джеймса Клерка Максвелла  
посвящается.*

университеты. Максвелл решает посвятить себя физике.

13 июня 1831 года в г. Эдинбурге в шотландской семье лэйрда (лендлорда) родился великий в будущем физик Джеймс Клерк Максвелл [1]. Спустя несколько месяцев 4 октября 1831 года гениальный английский физик Майкл Фарадей (член Лондонского королевского общества, академик Санкт-Петербургской, Парижской и других всемирно известных академий) сделал выдающееся открытие – открытие закона электромагнитной индукции, имевшее и имеющее колоссальное воздействие на мировую физическую науку и электротехнику, без которого немислимы все основные современные способы производства и канализации электроэнергии, новейшие электротранспортные средства передвижения, способы и пути передачи на расстояние электрических сигналов и бытовые технические блага нашей цивилизации. Буквально через несколько дней после своего открытия электромагнитной индукции Фарадей создает первый в мире элементарный электрогенератор [2], в котором воочию воплощается взаимодействие великих сил природы – электричества и магнетизма. Фарадей с интервалом в девять лет (1831–1840 годы) делает величайшие технические открытия, которые производят техническую революцию в жизни человечества – он изобретает принципиальные работоспособные схемы электрогенератора и электродвигателя и тем самым открывает новую эпоху – эпоху электричества. Выходят в свет первые серии многотомного научного труда Фарадея "Экспериментальные исследования по электричеству" [3]. Работы Фарадея приводят к началу разработок и широкому распространению и применению в технике различных электромагнитных устройств. Делаются первые опыты и появляются первые успехи в области электрического телеграфа. Инженеры и техники подумывают о прокладке по дну Атлантического океана электрического кабеля между Европой и Америкой. В физической науке жизненно встает задача по разработке единой теории электромагнетизма.

Но для Максвелла еще не наступило его "звездное время" – пока школа (Эдинбургская академия – гимназия 1841–1847 годы), а затем Эдинбургский (1847–1850 годы) и Кембриджский (1850–1854 годы)



*Джеймс Клерк Максвелл (1831г.–1879г.)  
(с гравюры Стодарты).*

Историки науки и библиографы Максвелла отмечают, что неизгладимое впечатление на молодого Максвелла произвел указанный нами выше печатный труд Фарадея [3], практически лишенный математических выкладок, но полный экспериментальных результатов по электромагнетизму и новых физических идей.

Заметим, что к этому времени в мировой физической науке существовало две теории электричества: первая – теория "силовых линий (трубок)" Фарадея и вторая – теория, разработанная великими французскими учеными Кулоном, Ампером, Био, Саваром, Араго и Лапласом. В последней (второй) теории исходной точкой являлось представление о "дальнодействии" – мгновенном действии на расстоянии одного физического тела на другое без промежуточной среды. Теория великих французов была прекрасно оформлена математически и имела изящный вид. Воззрения Фарадея в корне расходились с такими представлениями ученых французской физической школы. Фарадей был убежден в том, что "материя не может

действовать там, где ее нет" [2]. Среду, через которую передается воздействие от одного физического тела к другому, Фарадей впервые называет словом "поле". Это "поле", по его мнению, пронизано "магнитными и электрическими силовыми линиями". Однако сторонники концепции "мгновенного дальнего действия" не принимают всерьез теоретических построений Фарадея, хотя восхищаются результатами его экспериментальных исследований в области электрических и магнитных явлений.

Именно в это время с 1856 года Максвелл и начинает свою упорную и многолетнюю борьбу за теорию Фарадея. Вчитываясь в фарадеевские материалы «Экспериментальных исследований по электричеству» [3], Максвелл приходит к выводу, что упреки французских физиков в «нематематических воззрениях» Фарадея были поверхностными и несправедливыми. Позже Максвелл напишет: "Когда я стал углубляться в изучение работ Фарадея, я заметил, что метод его понимания тоже математичен, хотя и не представлен в условной форме математических символов. Я также нашел, что его метод может быть выражен в обычной математической форме и таким образом может быть сопоставлен с методами признанных математиков" [3]. Не форма представления Фарадеем своих научных материалов волновала Максвелла. В трудах Фарадея его интересовали прежде всего новые прогрессивные физические воззрения на явление электромагнетизма. Максвелл полностью принимает фарадеевскую концепцию "поля". Присоединяется он и к "силовым линиям" Фарадея [4]. "Не следует смотреть на эти линии как на чисто математические абстракции. Это – направления, в которых среда испытывает натяжение, подобное натяжению веревки" – считает Максвелл [5]. Эта научная работа в 1856 году стала первой статьей Джеймса Клерка Максвелла по электричеству. Максвелл, как и Фарадей, целиком принимает идею великого французского физика Ампера о круговом магнитном поле, окружающем проводник с электрическим током.

Максвелл это положение для среды (проводника и окружающего его пространства) записывает в математической форме в виде следующего дифференциального уравнения:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{\delta}, \quad (1)$$

где  $\vec{H}$  – вектор напряженности магнитного поля;  $\vec{\delta}$  – вектор плотности электрического тока, в который Максвелл включает и "ток смещения", связанный со смещением электрических зарядов в проводящих и непроводящих средах.

Заметим, что в (1) Максвелл вместо символа "rotor" – вихрь пользовался словом "curl" – завихор с тем же математическим значением. Физический смысл выражения (1) может быть легко понят и неспециалистом: операция  $\operatorname{rot}$  показывает в данном случае, что вектор  $\vec{H}$  вращается вокруг вектора  $\vec{\delta}$ . Уравнение (1) свидетельствует о том, что магнитное поле создается током. Это является обобщением и дополнением электродинамики Ампера.

Максвелл, используя представление Фарадея о природе электромагнитной индукции – возникновении электричества в контуре, число магнитных "силовых линий" в котором изменяется то ли вследствие относительного движения контура и магнита, то ли вследствие изменения во времени  $t$  магнитного поля, после многолетних трудов и научных поисков записывает такое дифференциальное уравнение:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

где  $\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля;  $\vec{B}$  – вектор индукции магнитного поля.

В (2) математическая операция  $\operatorname{rot}$  означает вращение вектора  $\vec{E}$  и охват им некоторого источника, которым в нашем случае является изменяющееся

во времени  $t$  магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ . В контуре, охватывающем источник изменяющегося магнитного поля, наводится электродвижущая сила, а в пространстве возникает новое электрическое поле. Знак "минус" в правой части выражения (2) показывает, что направление возникающего в замкнутом контуре из-за электромагнитной индукции тока таково, что последний (ток) препятствует изменению в нем (контуре) магнитного потока  $\dot{O} = \int_{S_k} \vec{B} d s_k$ , где

$S_k$  – площадь контура, пронизываемая магнитным полем. Таким образом, уравнение (2) отражает закон электромагнитной индукции Фарадея – возникновение электрического поля за счет изменения индукции магнитного поля. Любое изменение магнитного поля приводит в соответствии с (2) к возникновению в пространстве вихревого электрического поля.

Согласно воззрениям Фарадея и Максвелла "электрические силовые линии" начинаются и кончаются на электрических зарядах, являющихся источниками электрического поля. "Магнитные силовые линии" относительно проводника с током располагаются кольцеобразно, а у колец, как известно, нет ни начала, ни конца. Поэтому "магнитные силовые линии" проводника с током не могут где-то начинаться и где-то кончаться – они замкнуты сами на себя. Известно, что в математике для обозначения такой ситуации с источниками поля применяется операция дивергенции ( $\operatorname{div}$ ), так как дивергенция является мерой источника. В этой связи Максвелл уравнения (1) и (2) дополняет нижеследующими двумя уравнениями:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho; \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (4)$$

где  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$  – вектор электрической индукции;  $\vec{B} = \mu \vec{H}$ ;  $\epsilon, \mu$  – соответственно диэлектрическая и

магнитная проницаемости среды;  $\rho$  – объемная плотность электрических зарядов.

Физически выражения (3) и (4) означают, что "силовые линии" электрического поля кончаются на электрических зарядах, плотность которых равна  $\rho$ , а "силовые линии" магнитного поля не заканчиваются нигде, так как они замкнуты сами на себя и всюду непрерывны. Выражения (1)–(4) и составляют всемирно известные уравнения Максвелла для проводящих и непроводящих сплошных сред, которые для каждого из конкретных случаев их (сред) технической реализации дополняются соответствующими граничными и начальными условиями. Система научных взглядов, которая легла в основу уравнений (1)–(4), получила в физике и электротехнике название максвелловской теории электромагнитного поля, которой Джеймс Клерк Максвелл посвятил практически половину своей непродолжительной жизни, оборвавшейся от тяжелой болезни 5 ноября 1879 года. Следует отметить тот факт, что вышеприведенные четыре уравнения Максвелла (1)–(4) в указанной компактной форме записи, употребляемой электрофизиками и электротехниками и до сих пор, самим Максвеллом вначале представлялись в виде двенадцати уравнений [6], которые в свое время были "расчищены" от второстепенных соотношений известными учеными-электротехниками Герцем и Хевисайдом и сокращены до четырех – самых важных.

Теория электромагнитного поля Максвелла продемонстрировала триумф физических идей Майкла Фарадея, касающихся электромагнетизма. По меткому и образному выражению знаменитого американского физика Роберта Милликена "Максвелл облек плебейски обнаженные представления Фарадея в аристократические одежды математики" [2]. Еще в 1861 году Максвелл показал, что "свет есть электромагнитное возмущение". Максвелл считал, "что точно так же, как существуют излучения световые, должны существовать и излучения электромагнитные". Тридцатилетний Максвелл медленно, но планомерно подходит к великому открытию – открытию идентичности световых и электромагнитных волн, а затем и к своему величайшему открытию – к электромагнитной теории света. В статье "Динамическая теория" Максвелл впервые использовал термин "электромагнитное поле". Предложенную в этой статье теорию он называет "теорией электромагнитного поля", содержащей в развернутом виде и так называемые сейчас в электродинамике уравнения Максвелла. Тем самым Джеймс Клерк Максвелл прибавляет к веществу – известному тысячелетия виду материи еще один ее ранее неизвестный вид – электромагнитное поле. В 1864 году из-под пера тридцатитрехлетнего Максвелла впервые появились слова "электромагнитные волны". Создав новую теорию электромагнетизма – теорию электромагнитного поля и изложив ее в завершенном виде в своем известном научном труде "Трактат об электричестве и магнетизме" [6], Максвелл понял, что электромагнитное поле в пространстве распространяется в виде поперечных электромагнитных волн.

В предсказании электромагнитных волн Максвелл обогнал свое время. Он не мог знать того, что еще в 1832 году Майкл Фарадей оставил в Лондонском королевском обществе для хранения в архиве запечатанный конверт с надписью "Новые воззрения, подлежащие в настоящее время хранению в архивах Королевского общества" [1,3]. Лишь через сто шесть лет в 1938 году этот конверт был вскрыт английскими учеными. На пожелтевшем листке, находившемся в конверте, содержались слова и мысли, потрясшие всех собравшихся. Оказалось, что уже Фарадей ясно представлял себе то, что "индуктивные явления распространяются в пространстве с некоторой скоростью в виде волн". Майкл Фарадей на этом бумажном листке 12 марта 1832 года написал: "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" [2].

История подтвердила правоту этих и других интуитивных догадок, предположений и умозаключений Майкла Фарадея, касающихся явлений электричества и магнетизма. Научные работы и достижения в области электромагнетизма как Фарадея, так и Максвелла выдержали самые суровые испытания – испытания временем. Нильс Бор, выдающийся физик двадцатого столетия, предложивший миру жизнеспособную модель атома вещества, на 100 – летнем юбилее Джеймса Клерка Максвелла в 1931 году сказал: "Научный язык Ньютона и Максвелла останется языком физиков на все времена" [1].

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Карцев В.П. Максвелл/ Серия: Жизнь замечательных людей.-М.: Молодая гвардия, 1976.-336с.
- [2] Карцев В.П. Приключения великих уравнений.-М.: Знание, 1978.-224с.
- [3] Боев В.М. К 175-летию опубликования первой серии "Экспериментальных исследований по электричеству" Майкла Фарадея// Электротехника і електромеханіка.-2004.-№3.-С.5-7.
- [4] Максвелл Д.К. О фарадеевских силовых линиях.-М.: 1907.
- [5] Максвелл Д.К. О фарадеевских линиях силы// Труды Кембриджского философского общества.-1856.-том 10.-56с.
- [6] Maxwell J.C. A treatise on electricity and magnetism, vol. II, Clarendon Press, Oxford, 1873.

Поступила 01.11.2004