

*К 50-летию факультета „Фундаментальные науки“
МГТУ им. Н.Э. Баумана*

Электромагнитное поле

ФИЗИКА В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Серия основана в 2003 году

Научные редакторы

д-р физ.-мат. наук, проф. Л.К. Мартинсон

д-р физ.-мат. наук, проф. А.Н. Морозов

Москва

Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана

2013

Л.К. Мартинсон, А.Н. Морозов,
Е.В. Смирнов

Электромагнитное поле

*Допущено Научно-методическим советом по физике
Министерства образования и науки
Российской Федерации в качестве учебного пособия
для студентов высших технических учебных заведений*

Москва
Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана
2013

УДК537.8(078)
ББК 22.313я7
М29

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры физики Московского
авиационного института (национального исследовательского
университета) Г.Н. Измайлов;
зав. кафедрой физики Московского государственного
университета геодезии и картографии,
д-р техн. наук, проф. В.И. Троицкий

Мартинсон Л. К.

М29 Электромагнитное поле : учеб. пособие / Л. К. Мартинсон,
А. Н. Морозов, Е. В. Смирнов. — М. : Изд-во МГТУ им.
Н.Э. Баумана, 2013. — 422, [2] с. : ил. — (Физика в техни-
ческом университете).

ISBN 978-5-7038-3697-2

Рассмотрено электромагнитное поле, посредством которого
в классической физике осуществляется электромагнитное взаимо-
действие электрических зарядов — фундаментальное физическое
взаимодействие, проявляющееся не только в электромагнитных
явлениях, но и в ряде других явлений и процессов. В основе теории
лежат уравнения Максвелла, которые дают математически строгое
и полное описание всех известных в природе явлений электро-
магнетизма. Приведено решение большого числа задач, иллю-
стрирующих теоретический материал, а также развивающих и до-
полняющих его. Описаны новейшие технические достижения
в области электромагнетизма.

Материал, приведенный в учебном пособии, соответствует курсу лекций, читаемых авторами в МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках курса общей физики.

Для студентов технических университетов и вузов.

УДК 537.8(078)
ББК 22.313я7

© Мартинсон Л.К., Морозов А.Н.,
Смирнов Е.В., 2013
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013

ISBN 978-5-7038-3697-2

Оглавление

Предисловие	7
Введение	8
1. Электростатическое поле в вакууме	10
1.1. Электрические заряды	11
1.2. Закон Кулона. Электрическое поле	16
1.3. Напряженность электростатического поля. Силовые линии. . .	21
1.4. Принцип суперпозиции для электростатических полей	26
1.5. Теорема Гаусса для электростатического поля	34
1.6. Расчет электрических полей с помощью теоремы Гаусса . . .	41
1.7. Потенциал электростатического поля	49
1.8. Уравнение Пуассона для потенциала электростатического поля.	58
2. Электростатическое поле в диэлектрике	65
2.1. Полярные и неполярные молекулы. Диполь в электрическом поле.	66
2.2. Поляризация диэлектриков	70
2.3. Теорема Гаусса для поля в диэлектрике	80
2.4. Условия на границе раздела диэлектриков	86
3. Электрическое поле заряженных проводников	91
3.1. Электростатика проводников	92
3.2. Электрическая емкость проводников и конденсаторов	100
3.3. Энергия заряженного проводника и конденсатора	105
3.4. Энергия электрического поля	110
4. Электрический ток	116
4.1. Сила и плотность тока	117
4.2. Уравнение непрерывности	122
4.3. Электрическое поле проводника с током	125
4.4. Сторонние силы	126
4.5. Закон Ома	129
4.6. Правила Кирхгофа	141
4.7. Закон Джоуля — Ленца	147
4.8. Зависимость сопротивления проводников от температуры. Сверхпроводимость	154
4.9. Источники тока	162
5. Магнитное поле в вакууме	168
5.1. Магнитное поле и его характеристики	168
5.2. Закон Био — Савара — Лапласа	172
5.3. Расчет магнитных полей проводников с токами	176
5.4. Теорема Гаусса для магнитного поля	184
5.5. Теорема о циркуляции вектора индукции магнитного поля . . .	187
5.6. Понятие о векторном потенциале	196
6. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях	199
6.1. Сила Лоренца	200
6.2. Движение частицы в постоянном электрическом поле	203

6.3. Движение частицы в однородном магнитном поле	206
6.4. Движение заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях	211
6.5. Движение заряженных частиц в неоднородных электрическом и магнитном полях	216
6.6. Ускорители заряженных частиц	224
6.7. Эффект Холла	236
6.8. Ионные и плазменные двигатели	240
7. Проводники с током в магнитном поле	250
7.1. Действие магнитного поля на проводник с током	250
7.2. Контур с током в магнитном поле	257
7.3. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле	266
8. Магнитное поле в веществе	273
8.1. Вектор намагниченности	274
8.2. Вектор напряженности магнитного поля	281
8.3. Условия на границе раздела двух магнетиков	287
8.4. Магнитное поле в однородном магнетике	292
8.5. Диамагнетизм	295
8.6. Парамагнетизм	305
8.7. Ферромагнетизм	312
9. Электромагнитная индукция	333
9.1. Закон электромагнитной индукции	333
9.2. Природа электромагнитной индукции	339
9.3. Самоиндукция	346
9.4. Взаимная индукция	354
9.5. Энергия магнитного поля	359
9.6. Силы, действующие в магнитном поле. Магнитное давление	366
9.7. Квазистационарный переменный ток	374
9.8. Применение электромагнитной индукции	383
10. Уравнения Максвелла для электромагнитного поля	390
10.1. Вихревое электрическое поле	391
10.2. Ток смещения	396
10.3. Закон полного тока	400
10.4. Основные положения электромагнитной теории Максвелла	402
10.5. Преобразования Лоренца для электрического и магнитного полей	405
Заключение	410
Литература	412
Именной указатель	413
Предметный указатель	416
Приложение	422

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие является очередным томом серии «Физика в техническом университете», выпускаемой с 2003 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана. В пособии изложены основные законы электромагнетизма, базирующиеся на фундаментальных уравнениях Максвелла. При этом основное внимание уделено физической стороне рассматриваемых явлений, а также детальному описанию основных экспериментов в данной области. Приведено большое число задач с подробным решением, которые дополняют и расширяют теоретический материал. Рассмотрено практическое применение последних достижений современной физики при создании новых электромагнитных приборов и устройств.

Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций по общей физике, который авторы читают в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Авторы признательны профессору В.И. Троицкому и возглавляемой им кафедре физики Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), а также профессору МАИ (ГТУ) Г.Н. Измайлову за рецензирование рукописи и критические замечания, способствовавшие улучшению структуры и содержания учебного пособия. Авторы благодарят своих коллег — профессоров А.М. Макарова, В.В. Онуфриева, доцентов О.С. Еркович, И.В. Кириллова, В.В. Сидоренкова — за плодотворное обсуждение материала пособия, а также доцента Н.К. Веретимус за помощь в техническом оформлении.

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитное взаимодействие является одним из основных видов фундаментальных взаимодействий, осуществляемых в классической физике посредством электромагнитного поля — фундаментального физического поля, взаимодействующего с электрически заряженными телами. Электрическая и магнитная составляющие электромагнитного поля при определенных условиях могут порождать друг друга, поэтому их следует рассматривать как проявление единого электромагнитного поля. Идея электромагнитного поля — революционная для своего времени — была предложена в середине XIX в. М. Фарадеем, который считал, что электрически заряженное тело создает особое состояние окружающей среды, в результате чего его действие передается на другие тела.

В основу теории электромагнитного поля положены уравнения Максвелла, позволяющие математически строго и полно описывать явления электромагнетизма в рамках классической физики. В процессе своих исследований Дж. Максвелл писал М. Фарадею: «Сейчас, насколько мне известно, Вы являетесь первым человеком, у которого возникла идея о том, что тела действуют друг на друга на расстоянии посредством обращения окружающей среды в состояние напряжения, идея, в которую, действительно, следует поверить...».

Уравнения электромагнитного поля были получены Дж. Максвеллом во второй половине XIX в. путем обобщения большого числа экспериментальных результатов, накопленных к этому времени. Осмысление законов Кулона, Био — Савара — Лапласа, Эрстеда, Ампера, Фарадея позволило Дж. Максвеллу прийти к понятиям вихревого электрического поля и тока смещения, эквивалентного по своему магнитному действию току проводимости. С помощью уравнений Максвелла, связывающих электрические

и магнитные поля с зарядами и токами, оказалось возможным не только описать все известные эффекты электромагнетизма, но и предсказать новые явления, в частности существование электромагнитных волн.

Теоретические выводы, следующие из уравнений Максвелла, подтверждены экспериментально, а основанная на них классическая электродинамика обусловила многочисленные технические приложения явлений электромагнетизма. Уравнениям Максвелла принадлежит важная роль в развитии физики, а теория электромагнитного поля стала первой полевой теорией.

Проявления электромагнетизма в самых разнообразных физических процессах — механических, тепловых, оптических, атомных и др. — определяют основополагающее место этого раздела в курсе общей физики технического университета. Следует также отметить, что глубокое изучение физики электромагнитных явлений закладывает надежный фундамент для дальнейшего освоения технических дисциплин.

Целью данного учебного пособия является систематизация и обобщение знаний по физике электромагнетизма, формирование целостного представления о физике электромагнитного поля и обсуждение экспериментальных фактов, отражающих создание и историю развития теории электромагнитного поля.

В учебном пособии подробно описаны последние технические достижения в области электромагнетизма: Большой адронный коллайдер; токамак ITER (Франция), предназначенный для решения задачи об управляемом термоядерном синтезе; ионные и плазменные ракетные двигатели, применяемые в настоящее время для космических полетов. Большое внимание уделено описанию практического внедрения последних достижений современной физики, в том числе нанотехнологий, при создании новых электромагнитных приборов и устройств. В частности, рассмотрен магнитно-силовой микроскоп и приведена полученная с его помощью доменная структура жесткого диска персонального компьютера.

Большое число задач с решениями, приведенных в учебном пособии, не только обеспечивает усвоение теоретического материала, но и вырабатывает у студентов навыки проведения самостоятельных теоретических расчетов. Подбор задач акцентирует внимание читателя на наиболее интересных и актуальных вопросах электромагнетизма.

1. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ

Электрическое взаимодействие тел было обнаружено еще в античном мире при наблюдении способности натертого куска янтаря притягивать легкие предметы. Поэтому само слово «электричество» происходит от греческого названия янтаря. Установлено, что электрическое взаимодействие тел связано с наличием у них электрических зарядов. В соответствии с современными представлениями заряды тел обусловлены наличием заряженных частиц (электронов и протонов) в атомах вещества. В 1785 г. Ш. Кулон, измеряя силу электрического взаимодействия заряженных тел на крутильных весах, установил, что сила электрического взаимодействия малых по размерам заряженных тел пропорциональна произведению их электрических зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Важным этапом в развитии физических представлений об электрическом взаимодействии тел стал переход в конце XIX в. от теории дальнодействия (И. Ньютон, А. Ампер и другие ученые) к теории близкодействия (М. Фарадей, Дж. Максвелл и другие ученые). В теории появляется представление об электрическом поле как материальном носителе электрического взаимодействия неподвижных электрических зарядов. Считается, что любой электрический заряд (заряженное тело) создает в окружающем пространстве электрическое поле, которое может воздействовать на электрические заряды других тел (частиц). Для описания свойств электростатического поля в каждой точке пространства применяют векторную силовую характеристику поля — напряженность \vec{E} поля и скалярную энергетическую характеристику — потенциал φ поля.

2. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ДИЭЛЕКТРИКЕ

При описании электрического поля в непроводящей диэлектрической среде кроме поля сторонних зарядов следует учитывать поле связанных зарядов. Такие заряды присутствуют в отдельных молекулах вещества и не могут покидать их. Однако возможно смещение этих связанных зарядов в пределах каждой молекулы с созданием электрического дипольного момента.

Процесс поляризации диэлектрика в электрическом поле можно описать количественно, если задать в каждой точке поляризованного диэлектрика вектор поляризованности \vec{P} , характеризующий дипольный момент единицы объема диэлектрика. Для изотропных диэлектриков с одинаковыми электрическими свойствами в различных направлениях вектор поляризованности \vec{P} пропорционален вектору напряженности \vec{E} электрического поля в диэлектрике и зависит от диэлектрической проницаемости ϵ вещества. При этом физические механизмы поляризации диэлектриков могут быть различными.

Источниками поля вектора \vec{P} являются связанные заряды в диэлектрике. Поэтому, если известна поляризованность в различных точках диэлектрика, то можно рассчитать поверхностную и объемную плотности связанных зарядов.

Вводя для описания электростатического поля в диэлектрике вектор электрического смещения \vec{D} , можно выделить поле сторонних зарядов и поле связанных зарядов. Сложив эти поля, можно определить напряженность результирующего электрического поля в диэлектрике. Обычно при внесении диэлектрика в электрическое поле вследствие влияния связанных зарядов напряженность поля уменьшается.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ПРОВОДНИКОВ

Особенности электрических свойств проводников обусловлены наличием у них свободных электрических зарядов, которые перемещаются в проводнике под действием электрического поля. В металлических проводниках такими зарядами являются свободные электроны.

В электростатике электрические заряды располагаются только на поверхности проводника. При этом электростатическое поле внутри проводника отсутствует, а потенциал всех точек проводника одинаков.

Электростатическое поле вне проводника зависит от распределения зарядов на его поверхности, которое в общем случае неравномерно и зависит от радиуса кривизны поверхности. Полный заряд проводника можно связать с его потенциалом, вводя электрическую емкость C проводника.

Для конденсатора, представляющего собой систему двух разноименно заряженных проводников, электрическая емкость конденсатора позволяет определить его заряд в зависимости от напряжения на его обкладках. Электрическая емкость конденсатора зависит от размеров, формы и взаимного расположения его обкладок и диэлектрической проницаемости среды, заполняющей пространство между обкладками.

Любая система электрических зарядов обладает потенциальной электростатической энергией, обусловленной электрическим взаимодействием зарядов. Поэтому любой заряженный проводник или конденсатор также обладает запасом энергии. Уже в электростатике можно прийти к выводу о том, что энергия заряженного проводника или конденсатора связана с его полем. Именно электрическое поле как материальный носитель взаимодействия обладает энергией, распределенной в пространстве с некоторой

4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Природные явления, связанные с движением заряженных частиц, например, разряды молний во время грозы или огни святого Эльма на высоких остроконечных предметах — мачтах кораблей, шпилях церквей, копьях воинов — известны человечеству с давних пор. Однако исследования законов, описывающих движение электрических зарядов, обуславливающее в том числе и отмеченные явления, были начаты сравнительно недавно — всего около двухсот лет назад. Решающую роль в дальнейших исследованиях электрических и магнитных явлений сыграло изобретение в 1800 г. итальянским физиком и физиологом А. Вольтой первого химического источника тока — *вольтова столба*. Изобретение А. Вольты означало наступление новой эпохи в развитии нашей цивилизации — эпохи электричества. В дальнейшем были созданы различные источники постоянного тока — гальванические элементы, аккумуляторы, термоэлементы, солнечные батареи и др., которые прочно вошли в нашу жизнь и широко используются в настоящее время в различных областях науки и техники, а также в бытовых приборах и устройствах.

Основной закон для электрической цепи постоянного тока, экспериментально установленный Г. Омом в 1826 г., был положен в основу исследований Э.Х. Ленца, Г. Кирхгофа, Дж. Джоуля, Б.С. Якоби и других физиков. Были получены важные результаты, касающиеся движения зарядов в электрических цепях, в том числе и выделения теплоты в проводниках с током.

Сопротивление, которое оказывают проводящие среды при протекании электрического тока, зависит не только от природы проводника, но и от его температуры. Важным физическим явлением, значимым как с научной, так и с прикладной точки зрения, является переход некоторых проводников в сверхпроводящее состояние, при котором их сопротивление обращается в нуль.

5. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ

Изучение силового взаимодействия постоянных магнитов и проводников с токами позволило М. Фарадею в 1845 г. прийти к представлению о магнитном поле как материальном носителе такого взаимодействия.

Любой проводник с током, как и любой движущийся электрический заряд, создает в окружающем пространстве магнитное поле. Это поле можно описать, определив в каждой точке пространства силовую характеристику поля — индукцию \vec{B} магнитного поля или векторный потенциал \vec{A} магнитного поля.

Расчет индукции магнитного поля, создаваемого проводником с током, можно провести с использованием закона Био — Савара — Лапласа и принципа суперпозиции для магнитного поля, а также с помощью теоремы о циркуляции вектора \vec{B} .

В отличие от электростатического поля магнитостатическое поле является непотенциальным вихревым полем с замкнутыми силовыми линиями. Для такого поля поток вектора \vec{B} магнитной индукции через любую замкнутую поверхность всегда равен нулю, а циркуляция вектора \vec{B} по замкнутому контуру в общем случае отлична от нуля и определяется суммарным током, протекающим через поверхность, ограниченную этим замкнутым контуром. Такие свойства магнитостатического поля обусловлены отсутствием в природе магнитных зарядов.

5.1. Магнитное поле и его характеристики

Магнитное взаимодействие. Представление о магнитном поле возникло при изучении магнитных взаимодействий. К таким силовым взаимодействиям относятся взаимодействия постоянных магнитов (примером такого магнита является магнитная

6. ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

Электромагнитное поле является уникальным физическим объектом, воздействие которого на заряженные частицы позволяет изучать их свойства и особенности движения в различных средах. С помощью электромагнитного поля можно формировать пучки заряженных частиц и ускорять их до скоростей, близких к максимально возможной скорости физических тел — скорости света в вакууме. Движение частиц в электрическом и магнитном полях широко используется в фундаментальных и прикладных исследованиях, его анализ позволяет получать информацию о заряде частицы, ее скорости, массе, а также о концентрации и подвижности частиц при их движении в проводящих средах.

Экспериментальные исследования движения частиц во внешних полях играли и продолжают играть очень важную роль в развитии физики и в познании общей картины мира. По связанным с этими исследованиями экспериментальным устройствам и установкам можно отмечать этапы познания человечеством структуры и свойств материи. Многие из них до сих пор имеют существенное практическое и познавательное значение. Это, например, камера Милликена, в которой по движению масляных капель в электрическом поле был определен заряд электрона, камера Вильсона для исследования ядерных излучений и космических лучей, установка Штерна — Герлаха, с помощью которой было продемонстрировано пространственное квантование магнитных моментов атомных систем, разнообразные ускорители заряженных частиц — от простейших линейных ускорителей до *Большого адронного коллайдера* (БАК), позволяющие изучать структуру вещества, и многие другие приборы и установки.

Управление движением заряженных частиц с помощью электрического и магнитного полей широко применяется в различных

7. ПРОВОДНИКИ С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Магнитное поле проявляется по силовому воздействию на проводники с током. Такая сила была впервые определена А. Ампером в 1820 г. при экспериментальном исследовании силового взаимодействия проводников с токами.

Отметим, что из закона Ампера для магнитного взаимодействия двух прямых проводников с токами следует определение основной единицы СИ: единицы силы тока — ампера — и возможность создания экспериментальной установки для хранения этого эталона силы тока.

Закон Ампера позволяет также описать силовое воздействие магнитного поля на замкнутые проводники с токами. В общем случае при помещении такого проводника (контура) с током в магнитное поле кроме результирующей силы, перемещающей контур, возникает момент сил Ампера, ориентирующий плоскость контура перпендикулярно линиям индукции магнитного поля. В частности, два взаимодействующих контура с токами будут стремиться установиться так, чтобы их плоскости были параллельны друг другу, а направление обоих токов было одинаковым.

При перемещении проводника с током в магнитном поле совершается работа, которая определяется магнитным потоком через поверхность, описанную проводником в пространстве при своем движении.

7.1. Действие магнитного поля на проводник с током

Закон Ампера. Исследуя экспериментально силовое воздействие магнитного поля на проводники с током, А. Ампер установил, что сила $d\vec{F}$, действующая на элемент $Id\vec{l}$ линейного проводника с током со стороны магнитного поля с индукцией \vec{B} , определяется следующей формулой:

8. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

Магнитные свойства различных веществ так же, как и их электрические свойства, с давних пор были объектом пристального внимания человечества, причем электричество и магнетизм первоначально воспринимались как совершенно не связанные друг с другом явления. Свое название магнетизм получил, по-видимому, от г. Магнезия в Малой Азии, в окрестностях которого был обнаружен магнитный железняк — камень, обладающий свойством притягивать железо. Первым письменным свидетельством о проявлениях магнетизма, в которых описывается притяжение и отталкивание намагниченных тел, а также намагничивание в их присутствии железных опилок, более 2 000 лет. В поэме «О природе вещей», написанной в I в. до н. э., римский поэт и философ Тит Лукреций Кар объяснял феномен магнетизма «магнитными токами», исходящими из магнита.

Одним из первых практических применений постоянных магнитов был компас, изобретенный в Китае более чем за 1 000 лет до н. э. В Европе этот навигационный прибор, без которого были бы невозможны великие географические открытия XV–XVII вв., стал известен только в XII в. Магниты также издавна применялись в лечебных целях, в частности в Древней Индии и Древнем Египте.

Детальное изучение магнитных свойств вещества было начато в XIX в. и продолжается в настоящее время. Предложенная А. Ампером на начальном этапе этих исследований в 1820 г. гипотеза о том, что магнетизм вещества объясняется замкнутыми молекулярными токами, циркулирующими в магнетиках, способствовала развитию микроскопического подхода к изучению магнетизма. Эта гипотеза получила подтверждение после открытия электронно-ядерной структуры атома. В настоящее время установлено, что магнитные свойства магнетиков определяются

9. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Ни одно изобретение, ни одно открытие в какой-либо области науки и техники не получало такого широкого и разнообразного практического применения, как открытое М. Фарадеем в 1831 г. явление электромагнитной индукции. Это открытие, давшее мощный импульс развитию электромагнетизма, обусловило переход научно-технического прогресса от «века пара», начавшегося с появления в 1769 г. паровой машины Дж. Уатта, к «веку электричества».

Сам М. Фарадей считал явление электромагнитной индукции наиболее важным в учении об электричестве: «Среди различного рода проявлений, по признакам которых принято подразделять электричество, нет, я полагаю, ни одного, которое превосходило бы или хотя бы было сравнимо с эффектом, получившим имя индукции. Она играет наибольшую роль во всех электрических явлениях, участвуя, по-видимому, в любом из них, и, действительно, носит характер первейшего существенного и основного начала».

Важно отметить, что М. Фарадей в процессе изучения явлений электромагнетизма отказался от ньютоновской концепции дальнего действия и ввел в физику совершенно новый объект — электромагнитное поле. А. Эйнштейн считал, что идея поля была самой оригинальной идеей М. Фарадея и самым важным открытием со времен И. Ньютона. Он писал: «Надо иметь могучий дар научного предвидения, чтобы распознать, что в описании электрических явлений не заряды и не частицы описывают суть явлений, а скорее пространство между зарядами и частицами».

9.1. Закон электромагнитной индукции

Опыты Х. Эрстеда и последовавшие за ними работы А. Ампера, Д. Араго, Ж. Био и Ф. Савара показали, что протекающий в проводнике электрический ток создает в окружающем пространстве

10. УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Логика развития теории электрических и магнитных явлений обусловила необходимость создания теории единого электромагнитного поля. Идея объединения полей в единое электромагнитное поле принадлежит М. Фарадею. Однако для ее осуществления имеющихся экспериментальных данных было недостаточно. Возникла необходимость не только теоретического обоснования явления электромагнитной индукции и введения понятия вихревого электрического поля, но и введения нового физического объекта — тока смещения. Эти теоретические обобщения позволили Дж. Максвеллу получить систему уравнений, описывающих как электрические, так и магнитные поля.

В настоящее время теория Максвелла подтверждена экспериментально, на ее основе предсказаны и обнаружены новые физические явления, в частности электромагнитные волны. Вся совокупность экспериментальных данных в области электромагнетизма описывается в рамках этой теории. Однако формализовать уравнения электродинамики оказалось легче, чем найти их общее решение. В связи с этим и сегодня при решении конкретных задач продолжают развиваться методы решения уравнений Максвелла.

Важное значение, обширную область применения и совершенство уравнений Максвелла отмечал известный физик XX в., лауреат Нобелевской премии по физике Р. Фейнман: «В истории человечества (если посмотреть на нее, скажем, через десять тысяч лет) самым замечательным событием XIX столетия, несомненно, будет открытие Максвеллом законов электродинамики. На фоне этого важного научного открытия гражданская война в Америке в том же десятилетии будет выглядеть мелким провинциальным происшествием».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенная в данном учебном пособии теория электромагнетизма описывает совокупность физических явлений, которые, по существу, и представляют собой электромагнитные явления. Из известных четырех видов взаимодействий — сильных (ядерных), слабых, электромагнитных и гравитационных — электромагнитные взаимодействия находятся на первом месте по широте и разнообразию физических проявлений и их практическому применению. Электромагнитными взаимодействиями обусловлены связь атомных электронов с ядрами, связь атомов в молекулах, особенности объединения атомов и молекул в макроскопические тела, взаимодействия между ними и т. д.

Электромагнитным силам принадлежит главная роль в формировании структуры материи и протекающих в ней физических процессов при взаимодействиях в достаточно широком диапазоне расстояний — $10^{-15} \dots 10^5$ м. При меньших расстояниях, сравнимых с размером ядра, более интенсивными оказываются сильные взаимодействия, а при больших расстояниях необходимо учитывать силы гравитации.

Классическая электродинамика Максвелла позволила открыть новую физическую реальность — электромагнитное поле. Подход, предложенный М. Фарадеем и теоретически разработанный Дж. Максвеллом, обусловил развитие и становление ряда физических теорий и широко используется в современной физике, например в теории гравитации, теории элементарных частиц и др. Теория электромагнитного поля составляет основу многих разделов физики, таких как магнитная гидродинамика, физика плазмы, физика радиоволн, волновая и нелинейная оптика, лазерная физика, астрофизика и т. д.

Широкое практическое применение законов электромагнетизма, начавшееся в мире после работ Дж. Максвелла, обеспечило

прогрессивный переход цивилизации от «века пара» к «веку электричества». Используя эти законы, можно относительно легко вырабатывать электрическую энергию, передавать ее от источника к потребителю и преобразовывать в другие виды энергии — тепловую, механическую, энергию излучения и т. д. Электротехника, радиотехника, телевидение, электронные средства связи — все эти отрасли также базируются на законах электромагнитного поля.

Для активного участия в развитии экономического потенциала страны, решения новых научно-технических задач выпускникам технических университетов наряду с другими знаниями необходимо глубокое знание основ теории электромагнитного поля — науки, которая позволяет изучать и описывать физические явления, происходящие в чрезвычайно широком пространственном диапазоне — от масштабов микромира до космических масштабов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Астахов А.В., Широков Ю.М.* Электромагнитное поле. М.: Наука, 1980. 360 с.
2. *Иродов И.Е.* Задачи по общей физике. М.: ЗАО «Издательство БИНОМ», 1998. 448 с.
3. *Иродов И.Е.* Электромагнетизм. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. 352 с.
4. *Калашиников С.Г.* Электричество. М.: Наука, 1963. 667 с.
5. *Мартинсон Л.К., Малов Ю.И.* Дифференциальные уравнения математической физики: Математика в техническом университете; вып. XII. учеб. для вузов / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. Изд. 4-е, стер. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 367 с.
6. *Матвеев А.Н.* Электричество и магнетизм. М.: Высш. шк., 1983. 463 с.
7. *Парселл Э.* Электричество и магнетизм / пер. с англ. М.: Наука, 1971. 448 с.
8. *Савельев И.В.* Курс общей физики: в 5 кн. Кн. 2: Электричество и магнетизм. М.: Наука; Физматлит, 1998. 326 с.
9. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики: в 3 т. Т. 3: Электричество. М.: Наука, 1977. 688 с.
10. *Тамм И.Е.* Основы теории электричества. М.: Наука, 1976. 616 с.
11. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс Р.* Фейнмановские лекции по физике. Вып. 5. Электричество и магнетизм / пер. с англ. М.: Мир, 1977. 304 с.
12. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс Р.* Фейнмановские лекции по физике. Вып. 6. Электродинамика / пер. с англ. М.: Мир, 1977. 352 с.
13. *Физический энциклопедический словарь.* М.: Сов. энциклопедия, 1984. 944 с.
14. *Винтайкин Б.Е.* Физика твердого тела. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 360 с.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Авогадро Амедео (1776–1856) 301
Акулов Николай Сергеевич (1900–1976) 322
Альфвен Ханнес Улоф Йоста (1908–1995) 222
Ампер Андре Мари (1775–1836) 8, 10, 118, 163, 169, 250
Араго Доминик Франсуа (1786–1853) 162, 333
Арцимович Лев Андреевич (1909–1973) 241, 372
- Бардин Джон (1908–1991) 161
Баркгаузен Генрих Георг (1881–1956) 327
Барнетт Сэмюел Джексон (1873–1956) 315
Беднорц Йоханнес Георг (р. 1950) 161
Беннет Уиллард Харрисон (1903–1987) 371
Био Жан Батист (1774–1862) 8, 172, 333
Битер Фрэнсис (1902–1967) 322
Боголюбов Николай Николаевич (1909–1992) 161
Больцман Людвиг (1844–1906) 72
Бор Нильс Хендрик Давид (1885–1962) 274
Будкер Герш Ицкович (1918–1977) 220, 224, 233
- Ван Аллен Джеймс (1914–2006) 222
Вебер Вильгельм Эдуард (1804–1891) 185
Вейсс Пьер Эрнест (1865–1940) 309, 329
Векслер Владимир Иосифович (1907–1966) 229, 232
Вернов Сергей Николаевич (1910–1982) 222
Вестон Эдвард (1850–1936) 164
Видероэ Рольф (1902–1996) 225, 233, 393
Вильсон Чарльз Томсон Рис (1869–1959) 199
Вольта Алессандро (1745–1827) 119, 162
- Гааз Вандер Иоханнес де (1878–1960) 315
Гальвани Луиджи (1737–1798) 162
Гамильтон Уильям Роуан (1805–1865) 39
Гаусс Карл Фридрих (1777–1855) 34, 80
Гейзенберг Вернер Карл (1901–1976) 329
Гельмгольц Герман Людвиг Фердинанд (1821–1894) 344, 389
Генри Джозеф (1797–1878) 130
Герлах Вальтер (1889–1979) 199
Глушко Валентин Петрович (1908–1989) 241
- Даниель Джон Фредерик (1790–1845) 163
Джоуль Джеймс Прескотт (1818–1889) 116, 147, 149, 163
Дирак Поль Адриен Морис (1902–1984) 63
Дорфман Яков Григорьевич (1898–1974) 329
Дюфе Шарль Франсуа (1698–1739) 11

- Зеебек Томас Иоганн (1770–1831)** 164
- Иваненко Дмитрий Дмитриевич (1904–1994)** 232
Иоффе Абрам Федорович (1880–1960) 169
- Йорк Герберт Франк (1921–2009)** 220
- Камерлинг-Оннес Гейке (1853–1926)** 159, 160
Капица Петр Леонидович (1894–1984) 371
Кар Тит Лукреций (99–55 до н. э.) 273
Керст Дональд Вильям (1911–1993) 233, 393
Кирхгоф Густав Роберт (1824–1887) 116, 141
Кокрофт Джон Дуглас (1897–1967) 225
Королев Сергей Павлович (1907–1966) 241
Кристи Самуил Хантер (1784–1865) 146
Кулон Шарль Огюстен (1736–1806) 8, 10, 16, 17
Купер Леон (р. 1930) 161
Курчатов Игорь Васильевич (1903–1960) 76
Кюри Пьер (1859–1906) 75, 76, 274, 331
- Ланжевен Поль (1872–1946)** 74, 307
Ландау Лев Давидович (1908–1968) 310, 324
Лаплас Пьер Симон (1749–1827) 8, 60, 172
Лармор Джозеф (1857–1942) 296
Лекланше Жорж (1839–1882) 163
Ленц Эмилий Христианович (1804–1865) 116, 147, 149, 163, 333
Лифшиц Евгений Михайлович (1915–1985) 324
Лоренц Хенрик Антон (1853–1928) 152, 200, 405
Лоуренс Эрнест Орlando (1901–1958) 227, 229
- Максвелл Джеймс Клерк (1831–1879)** 8, 9, 10, 18, 343, 390, 397, 402
Макмиллан Эдвин Матиссон (1907–1991) 229
Милликен Роберт Эндрюс (1868–1953) 12, 199
Мейсснер Вальтер Фриц (1882–1974) 160
Менделеев Дмитрий Иванович (1834–1907) 121, 160
Морозов Алексей Иванович (1928–2009) 247
Мюллер Карл Александр (р. 1927) 161
- Неель Луи Эжен Феликс (1904–2000)** 332
Нейман Франц Эрнст (1798–1895) 336
Ньютон Исаак (1643–1727) 10
- Оксенфельд Роберт (1901–1993)** 160
Ом Георг Симон (1787–1854) 116, 129, 130, 163
Остроградский Михаил Васильевич (1801–1862) 40
О’Нилл Джерард (1927–1992) 211
- Паули Вольфганг (1900–1958)** 309

- Петров Василий Владимирович (1761–1834) 163
Планте Гастон (1834–1889) 163
Померанчук Исаак Яковлевич (1913–1966) 232
Пост Ричард Фримен (р. 1918) 220
Пуассон Симеон Дени (1781–1840) 58, 197
- Резерфорд Эрнест** (1871–1937) 19, 224, 274
- Савар Феликс (1791–1841) 8, 172, 333
Сахаров Андрей Дмитриевич (1921–1989) 372
Снеллиус Виллеборд (1580–1626) 217
Стёрмер Карл Фредрик Мюлерц (1874–1957) 222
Стокс Джордж Габриэль (1819–1903) 52
Столетов Александр Григорьевич (1839–1896) 274, 317
- Тамм Игорь Евгеньевич (1895–1971) 372
Тесла Никола (1856–1943) 170
Томсон (Кельвин) Уильям (1824–1907) 18
- Уатт Джеймс (1736–1819) 333
Уитстон Чарлз (1802–1875) 146
Уолтон Эрнест Томас Синтон (1903–1995) 225
- Фарадей Майкл** (1791–1867) 8, 10, 15, 18, 23, 163, 168, 284, 295, 333
Фейнман Ричард Филлипс (1918–1988) 390
Френкель Яков Ильич (1894–1952) 329
Фуко Жан Бернар Леон (1819–1868) 386
- Хевисайд Оливер (1850–1925) 387
Холл Эдвин Герберт (1855–1938) 236, 237
- Циолковский Константин Эдуардович** (1857–1935) 240
- Чудаков Александр Евгеньевич** (1921–2001) 222
- Шрёдингер Эрвин** (1887–1961) 198
Шриффер Джон Роберт (р. 1931) 161
Штерн Отто (1888–1969) 199
- Эйнштейн Альберт (1879–1955) 315, 405
Эйхенвальд Александр Александрович (1864–1944) 169, 399
Эрстед Ханс Кристиан (1777–1851) 8, 163, 169, 333
- Яблочков Павел Николаевич** (1847–1894) 386
Якоби Борис Семенович (Мориц Герман) (1801–1874) 116

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Бетатрон 393

Бетатронное условие 396

Большой адронный коллайдер 199, 232

Вектор

– намагниченности 274

– плотности тока 118

– электрического смещения 80

Взаимодействие обменное 329

Вихревое электрическое поле 343, 391

Восприимчивость вещества магнитная 282

Время релаксации 141, 350

Гиромангнитные явления 314

Гистерезис магнитный 318

Гистерезиса петля 76

Давление магнитное 368

Двигатель

– ракетный ионный 241

– – плазменный 246

Диамagnetизм 295

Диэлектрическая восприимчивость вещества 71

– проницаемость вещества 80

Домен 76

Дуанты 227

Закон

– Ампера 250

– Био – Савара – Лапласа 172

– Джоуля – Ленца 147

– Кулона 17

– Кюри 369

– Кюри – Вейсса 309

– полного тока 400

– сохранения электрического заряда 15

– электромагнитной индукции 333

Заряд частицы удельный 203

Излучение синхротронное 231

Индуктивность

– контура 346

- контуров взаимная 355
- соленоида 347
- тороида 358
- Индукция взаимная 354
- магнитного поля 169
- остаточная 319
- электромагнитная 333
- Источник тока 127

- Квантовая электродинамика** 405
- Контур с током в магнитном поле 257
- Коэффициент
 - мощности 381
 - самоиндукции 346
 - сопротивления температурный 157
- Кривая намагничивания основная 317

- Линия тока 117
- Литий-ионные источники 165
- Ловушка магнитная адиабатическая 220

- Магнитная энергия контуров с токами** 362
- Магнитное поле 169
- Магнитные токи 277
- Магнитный момент контура с током 257
 - поток
- Магнитомеханические явления 314
- Магнитное взаимодействие
 - прямых токов 176
 - круговых токов 178
- Магнитное поле движущегося заряда 174
- Магнитные поля проводников с токами 173
- Мостик Уитстона 146
- Мощность
 - тока удельная 148
 - – переменного 379

- Намагниченность** 277
- Напряжение на участке цепи 129
- Напряженность поля
 - – сторонних сил 128
 - – электрического 22
 - – магнитного 170, 281
- Нейтронография магнитная 314
- Нить тока 117

Объемная плотность энергии

– электрического поля 111

– магнитного поля 361

Определение ампера 253

Отношение гиромангнитное 275, 315

Падение напряжения на участке цепи 129

Парамагнетизм 305

Пинч-эффект 371

Плотность

– тока смещения 399

– электрических зарядов

– – линейная 13

– – поверхностная 14

– – объемная 14

Подвижность носителя тока 120

Полярные и неполярные диэлектрики 71

Поляризованность диэлектрика 70

Постоянная

– времени

– Кюри 309

Потенциал электростатического поля 49, 54

Потенциальная энергия контура с током в магнитном поле 262

Поток вектора

– напряженности электрического поля 34

– электрического смещения 81

– индукции магнитного поля 184

Потокосцепление 338

Пояс радиационный 222

Правило

– Кирхгофа первое 142

– – второе 142

– Ленца 335

Преломление линий вектора \vec{B} 290

Преобразования Лоренца

– для электрического и магнитного полей 405

Прецессия ларморовская 297, 299, 345

Принцип

– автофазировки 229

– суперпозиции

– – для электрического поля 26

– – для магнитного поля 171

Проводимость электрическая удельная 132

Проводники в электростатике 92

- Проницаемость магнитная
 - вещества 282
 - начальная 321
 - ферромагнетика 320
- Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле 266
- Радиус ларморовский 207
- Самоиндукция 346
- Сверхпроводимость 158
 - высокотемпературная 161
- Свойство потенциальности электростатического поля 50
- Связанные электрические заряды 77
- Сила
 - коэрцитивная 319
 - Лоренца обобщенная 200
- Силовые линии
 - электрического поля 24
 - магнитного поля 171
- Силы
 - пондеромоторные 366
 - сторонние 126
- Синхротрон 230
- Синхрофазотрон 232
- Скин-эффект 387
- Сопротивление
 - проводника удельное 130
 - реактивное 378
 - емкостное 378
 - индуктивное 378
 - электрическое 129
- Столб вольтов 116, 163
- Структура ферромагнетиков доменная 322
- Температура
 - критическая 158
 - Кюри 330
- Теорема взаимности 356
 - Гаусса
 - для электрического поля 38
 - для магнитного поля 186
 - Лармора 296
 - о циркуляции
 - вектора \vec{J} 278

- – вектора индукции магнитного поля 187
- – вектора напряженности электростатического поля 52
- Термоэлектричество 164
- Ток
 - вихревой 386
 - индукционный 334
 - квазистационарный 133, 374
 - конвекционный 117
 - переменный 374
 - проводимости 117
 - смещения 396
 - Фуко 386
 - электрический 117
- Точка
 - ветвления (узел) 141
 - Кюри 76, 331
 - Нееля 332
- Трубка тока 117

- Уравнение
 - колебательного контура 375
 - непрерывности 122
 - Пуассона
 - – для потенциала электростатического поля 58
 - – для векторного потенциала магнитостатического поля 197
- Ускоритель
 - линейный 225
 - – резонансный 225
- Уравнения
 - Максвелла 402
 - материальной среды 404
- Условие синхронизма 228
- Условия на границе раздела
 - двух диэлектриков 86
 - двух магнетиков 287
- Участок
 - цепи однородный 129
 - – неоднородный 129

- Фазотрон 230
- Ферромагнетизм 312, 328

Холла

- постоянная 237
- датчики ЭДС 240

Циклотрон 227

Частота циклотронная 207

Электрические поля заряженных тел 41

Электрический диполь 27

Электрическое поле 18

Электрическое смещение 80

Электростатическая

- энергия
- – системы электрических зарядов 107
- – заряженного проводника 107
- – конденсатора 108

Электродвижущая сила источника тока 127

Емкость

- уединенного проводника 100
- конденсатора 101

Электромагнитная индукция 334

Электромагнитное поле 8

Элемент Вестона нормальный 164

Энергия

- магнитного поля 359
- тока собственная 363
- токов взаимная 363

Эффект

- Баркгаузена 327
- Мейснера 160
- Холла 236

Явление

- гальваномагнитное 239
- – нечетное 239

Учебное издание

ФИЗИКА В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Мартинсон Леонид Карлович
Морозов Андрей Николаевич
Смирнов Евгений Васильевич

Электромагнитное поле

Редактор *Л.Т. Мартыненко*
Технический редактор *Э.А. Кулакова*
Художники *С.С. Водчиц, О.В. Левашова*
Корректор *Р.В. Царева*
Компьютерная графика *В.А. Филатовой*
Компьютерная верстка *И.Д. Звягинцевой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Сертификат соответствия № РОСС RU. АЕ51. Н 16228 от 18.06.2012

Подписано в печать 06.09.13. Формат 60×90 1/16.
Усл. печ. л. 26,5. Тираж 5000 экз. (1-й з-д 1–2500). Заказ №

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com