

*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 взаимодействие 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 электромагнетизма. Приведено решение большого числа задач, иллюстрирующих теоретический материал, а также развивающих и дополняющих 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.