

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА КЛАССИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

РУКОВОДСТВО
ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО
УСВОЕНИЯ КУРСА

А. М. МАКАРОВ
Л. А. ЛУНЁВА
К. А. МАКАРОВ



URSS

**А. М. Макаров,
Л. А. Лунёва, К. А. Макаров**

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА КЛАССИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

**Руководство
для фундаментального
усвоения курса**



URSS

МОСКВА

**Макаров Анатолий Макарович,
Лунёва Любовь Александровна,
Макаров Константин Анатольевич**

**Теория и практика классической электродинамики: Руководство
для фундаментального усвоения курса.** — М.: ЛЕНАНД, 2014. — 784 с.

Классическая электродинамика является одной из важнейших составляющих современного фундаментального научного естествознания, частью духовной культуры человечества и основой современного инженерного образования. В настоящей книге последовательно и подробно рассмотрены основные законы электромагнитного поля, история их открытия, практика их применения в конкретных ситуациях с использованием современных возможностей вычислительной физики и компьютерной техники. Уровень изложения материала несколько выше уровня стандартных учебных пособий по общему курсу физики. Совокупность задач с подробными решениями обеспечивает полноценное использование в практической деятельности результатов теории.

Книга может быть полезна студентам, аспирантам и преподавателям, в первую очередь технических университетов, а также может использоваться при самостоятельном изучении основ классической электродинамики.

Оригинал-макет предоставлен автором,
текст опубликован в авторской редакции.

Формат 60×90/16. Печ. л. 49. Зак. № ЗС-28.

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД».

117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, 11А, стр. 11.

ISBN 978-5-9710-0934-4

© А. М. Макаров, Л. А. Лунёва,
К. А. Макаров, 2014

© ЛЕНАНД, 2014

9212 ID 170269



9 785971 009344

НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА	
	E-mail: URSS@URSS.ru
	Каталог изданий в Интернете: http://URSS.ru
	Тел./факс (многоканальный): +7 (499) 724 25 45
	URSS

Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельцев.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	12
1. Основные представления и понятия классической электродинамики	14
1.1. Основные понятия	14
1.2. Координаты и время	17
1.3. Скаляр и вектор	19
1.4. Правило преобразования компонент векторов	22
2. Электростатическое поле в вакууме	27
2.1. Взаимодействие электрических зарядов	28
2.1.1. Электрический заряд.....	28
2.1.2. Первые электрические устройства и измерительные приборы.....	30
2.1.3. Закон Кулона.....	33
2.1.4. Принцип суперпозиции сил взаимодействия электрических зарядов.....	38
2.1.5. Примеры расчёта взаимодействия электрически заряженных тел конечных размеров	41
2.2. Напряжённость электростатического поля	52
2.2.1. Определение и физическое содержание понятия «напряжённость электростатического поля»	52
2.2.2. Принцип суперпозиции для вектора напряжённости электростатического поля.....	53
2.2.3. Напряжённость электростатического поля вдали от системы электрических зарядов конечных размеров	57
2.2.4. Электрическое поле.....	58
2.2.5. Способы представления скалярного и векторного полей.....	60
2.2.6. Примеры практического использования принципа суперпозиции при расчётах напряжённости электростатического поля.....	64
2.3. Теорема Гаусса для напряжённости электростатического поля в вакууме	89
2.3.1. Поток вектора	89

2.3.2. Интегральная форма теоремы Гаусса для вектора напряжённости электростатического поля в вакууме.....	91
2.3.3. Дифференциальная форма теоремы Гаусса для вектора напряжённости электростатического поля в вакууме.....	94
2.3.4. Вычисление дивергенции векторного поля	98
2.3.5. Соотношение между нормальными компонентами напряжённости электростатического поля при переходе через заряженную поверхность с распределёнными зарядами	101
2.3.6. Практическое использование теоремы Гаусса.....	104
2.4. Потенциал электростатического поля	123
2.4.1. Потенциальность поля центральных сил	123
2.4.2. Циркуляция вектора напряжённости электростатического поля.....	126
2.4.3. Непрерывность касательных составляющих напряжённости электростатического поля при переходе через заряженную поверхность.....	128
2.4.4. Локальное условие потенциальности электростатического поля.....	131
2.4.5. Определение напряжённости электростатического поля по известному распределению потенциала.....	133
2.4.6. Эквипотенциальные поверхности и силовые линии электростатического поля.....	135
2.4.7. Восстановление потенциала по известной напряжённости электростатического поля.....	136
2.4.8. Принцип суперпозиции для потенциала электростатического поля в вакууме	137
2.4.9. Энергия взаимодействия точечных электрических зарядов в вакууме	139
2.4.10. Энергия системы распределённых по объёму электрических зарядов в вакууме.....	142
2.4.11. Примеры практического использования принципа суперпозиции для расчёта распределения потенциала электростатического поля в пространстве.....	143
2.5. Уравнение Пуассона для потенциала электростатического поля	150
2.5.1. Вывод уравнения Пуассона в электростатике	150
2.5.2. Уравнение Пуассона в физике.....	152
2.5.3. Следствия из уравнения Пуассона.....	152
2.5.4. Вариационный принцип в электростатике.....	153
2.5.5. Потенциал электростатического поля, образованного системой электрических зарядов, расположенных известным способом в области конечных размеров	154

3. Электростатика проводников	157
3.1. Напряжённость и потенциал электростатического поля внутри и снаружи проводника	157
3.2. Распределение электрического заряда по поверхности уединённого проводника	166
3.3. Проводник во внешнем электростатическом поле	162
3.3.1. Сосредоточенный электрический заряд над бесконечной проводящей плоскостью	162
3.3.2. Сосредоточенный электрический заряд около проводящей сферы	167
3.3.3. Бесконечный круглый проводящий цилиндр в поле равномерно заряженной прямолинейной нити, параллельной оси цилиндра	172
3.3.4. Проводящий шар в однородном внешнем электростатическом поле	177
3.3.5. Бесконечный круговой проводящий цилиндр в однородном поперечном электростатическом поле постоянной напряжённости	180
3.4. Электрическая ёмкость	185
3.4.1. Ёмкость уединённого проводника	185
3.4.2. Ёмкость конденсатора	189
3.4.3. Система заряженных проводящих тел в безграничном пространстве	202
3.5. Электрическая энергия	206
3.5.1. Электрическая энергия заряженного уединённого проводника	206
3.5.2. Электрическая энергия конденсатора	209
3.5.3. Силы, действующие на проводник	210
4. Электростатическое поле в веществе	213
4.1. Электрический диполь. Поле диполя	213
4.2. Электрический диполь во внешнем электростатическом поле	217
4.3. Поляризованность среды. Диэлектрики и электреты	222
4.4. Теорема Гаусса для вектора поляризованности среды	228
4.5. Вектор \vec{D} . Теорема Гаусса для вектора \vec{D}	230
4.6. Соотношения для электрических величин на границе раздела двух диэлектриков	233

4.7. Примеры расчёта электрического поля с использованием теоремы Гаусса для вектора электрического смещения (вектора \vec{D})	238
4.7.1. Плоский конденсатор с неоднородным диэлектриком	238
4.7.2. Цилиндрический конденсатор с неоднородным диэлектриком	244
4.7.3. Сферический конденсатор с однородным диэлектриком	248
4.7.4. Погонная ёмкость двухпроводной линии.....	251
4.8. Энергия электростатического поля	253
5. Постоянный ток	256
5.1. Электрический ток и закон сохранения электрического заряда	256
5.2. Закон Ома. Закон Джоуля—Ленца	260
5.3. Правила Кирхгофа	265
5.4. Распределение электрического тока по проводнику	269
6. Стационарное магнитное поле в вакууме	271
6.1. Сила Ампера. Закон Био—Савара—Лапласа	274
6.2. Примеры расчёта магнитного поля при заданном распределении электрического тока в пространстве	281
6.2.1. Магнитное поле прямолинейного проводника с током	281
6.2.2. Магнитное поле на оси симметрии плоского кругового кольца с током	284
6.2.3. Индукция магнитного поля, образованного плоским тонким круговым контуром с током, в произвольной точке пространства	286
6.2.4. Магнитное поле соленоида (упрощенная модель)	291
6.2.5. Магнитное поле соленоида.....	295
6.2.6. Поверхностная модель земного магнетизма	299
6.2.7. Объёмная модель земного магнетизма.....	302
6.3. Силовые линии магнитной индукции	305
6.3.1. Силовые линии магнитного поля бесконечного прямолинейного проводника с током.....	306
6.3.2. Силовые линии магнитного поля плоского контура с током в форме окружности.....	307
6.3.3. Силовые линии магнитного поля совокупности прямолинейного и кругового токов	313

6.4. Дифференциальная и интегральная формы теоремы Гаусса для вектора индукции магнитного поля.....	317
6.5. Векторный потенциал магнитного поля	320
6.6. Вихревой характер магнитного поля	326
6.7. Скалярный потенциал магнитного поля.....	329
6.8. Индуктивность.....	331
6.9. Примеры расчёта индуктивности	337
6.9.1. Индуктивность длинного соленоида	337
6.9.2. Индуктивность коаксиального кабеля.....	338
6.9.3. Индуктивность двухпроводной линии	339
7. Магнитное поле в веществе	342
7.1. Магнитный момент.....	342
7.2. Магнитное поле контура с током	347
7.3. Магнитный диполь во внешнем магнитном поле	351
7.4. Магнитное поле в веществе.....	356
7.4.1. Намагниченность среды.....	356
7.4.2. Токи намагничения.....	357
7.4.3. Теорема о циркуляции намагниченности среды.....	359
7.4.4. Напряжённость магнитного поля.....	360
7.4.5. Магнитные свойства среды	361
7.4.6. Варианты построения теории магнитного поля в веществе	362
7.5. Соотношения между магнитными величинами на границе раздела двух магнетиков.....	365
7.6. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле	369
7.7. Энергия магнитного поля.....	372
8. Молекулярно-кинетические представления об электромагнитных свойствах среды	375
8.1. Материальные уравнения среды	375
8.2. Природа электрического тока в веществе.....	377
8.2.1. Металлы	378
8.2.2. Твёрдые полупроводники	379
8.2.3. Электролиты	380

8.2.4. Газы и плазма.....	382
8.3. Магнетики	384
8.4. Классическая теория электропроводности металлов	
Друде.....	387
8.4.1. Электропроводность металлов.....	389
8.4.2. Эффект Холла.....	392
8.4.3. Высокочастотная электропроводность металлов.....	395
8.4.4. Высокочастотная диэлектрическая проницаемость металлов.....	396
8.5. Намагничивание парамагнетиков и поляризация диэлектриков внешним полем. Теория Ланжевена—Дебая.....	398
9. Движение заряженных частиц в электромагнитном поле.....	407
9.1. Движение заряженных частиц в электрическом поле.....	407
9.1.1. Движение заряженных частиц в электрическом поле постоянной напряжённости.....	407
9.1.2. Движение заряженной частицы в стационарном неоднородном электрическом поле.....	414
9.2. Движение заряженной частицы в однородном электромагнитном поле.....	430
9.3. Движение заряженных частиц в магнитном поле.....	435
9.3.1. Движение частицы в однородном магнитном поле.....	435
9.3.2. Движение частицы в неоднородном магнитном поле.....	440
9.3.3. Дрейф заряженной частицы, вызванный неоднородностью величины магнитной индукции.....	441
9.3.4. Дрейф заряженной частицы, вызванный искривлением магнитных силовых линий.....	443
9.3.5. Адиабатический инвариант.....	446
9.4. Ускорители.....	449
9.5. Масс-спектрометр.....	453
10. Явление электромагнитной индукции. Квазистационарные процессы.....	456
10.1. Явление электромагнитной индукции.....	456

10.2. Квазистационарные процессы в простейших электрических цепях	465
10.2.1. RC-цепочка	465
10.2.2. RL-цепочка.....	475
10.2.3. Последовательный RLC-контур.....	483
10.2.4. RLC-контур с параллельным соединением элементов в цепи переменного тока	490
10.3. Переходные процессы в длинных линиях.....	493
11. Закон полного тока.....	497
11.1. Магнитное поле и электрические токи в магнитостатике	497
11.2. Закон сохранения электрического заряда. Ток смещения и закон полного тока	499
11.3. Закон Био—Савара—Лапласа. Ток смещения и закон полного тока	502
11.4. Циркуляция вектора напряжённости магнитного поля ...	510
12. Система уравнений Максвелла как основа классической электродинамики	519
12.1. Дифференциальная и интегральная формы системы уравнений Максвелла. Физическое содержание теории Максвелла.....	521
12.2. Основные свойства системы уравнений Максвелла	527
12.3. Соотношения на поверхности раздела двух сред	528
12.4. Закон сохранения электрического заряда	541
12.5. Теорема Пойнтинга.....	543
12.6. Импульс электромагнитного поля.....	546
12.7. Электромагнитные волны.....	550
12.8. Скалярный и векторный потенциалы электромагнитного поля.....	553
12.9. Запаздывающие потенциалы.....	559
12.10. Электромагнитное поле сосредоточенного электрического заряда, движущегося в пространстве с произвольной скоростью	562

13. Электродинамика и специальная теория относительности (СТО)	565
13.1. Системы координат. Скалярные, векторные и тензорные величины. Преобразования Лоренца	568
13.1.1. Проблема разложения вектора на составляющие	568
13.1.2. Декартовы координаты	571
13.1.3. Аффинные (косоугольные) координатные системы	574
13.1.4. Метрические соотношения в косоугольных системах координат	581
13.1.5. Преобразования координат	583
13.1.6. Вектор и тензор	595
13.1.7. Преобразования Лоренца и 4-пространство (мир Минковского)	596
13.1.8. Примеры практических приёмов вычислений с использованием тензорных обозначений в пространстве трех измерений	599
13.2. Специальная теория относительности и уравнения Максвелла в трёхмерном пространстве	607
13.2.1. Формулы преобразования электромагнитного поля	607
13.2.2. Инвариантность системы уравнений Максвелла относительно преобразований Лоренца	608
13.2.3. Уравнения Минковского для электромагнитного поля в движущейся среде	610
13.3. Классическая электродинамика в четырехмерном представлении	611
13.4. Ковариантная форма уравнений электродинамики	617
13.4.1. Тензоры электромагнитного поля	617
13.4.2. Ковариантность системы уравнений Максвелла	618
13.5. Инварианты электромагнитного поля	623
13.6. Сила Лоренца	630
13.7. Поле точечного электрического заряда, движущегося в вакууме по прямой с постоянной скоростью	635
Приложение 1. Основные соотношения векторного анализа	651
П.1.1. Координаты и время	651
П.1.2. Скаляр и вектор	653
П.1.3. Правило преобразования компонент векторов	659

П.1.4. Основные понятия теории поля.....	663
П.1.5. Дифференциальные операции векторного анализа	666
П.1.6. Оператор Гамильтона («набла»).....	673
П.1.7. Интегральные операции векторного анализа	674
П.1.8. Основные интегральные теоремы теории поля.....	680
П.1.9. Понятие о дивергенции векторного поля	682
П.1.10. Смысл понятия $rot \vec{a}$	684
П.1.11. Восстановление скалярного поля φ по заданному градиенту этого поля	687
П.1.12. Источники векторного поля	688
П.1.13. Задачи.....	690
Приложение 2. Некоторые методы решения уравнений Пуассона и Лапласа	715
П.2.1. Формула Грина. Ньютонов потенциал. Потенциал простого слоя. Потенциал двойного слоя.....	715
П.2.2. Метод разделения переменных (метод Фурье)	719
П.2.3. Вариационный метод Ритца.....	722
П.2.4. Метод Бубнова—Галёркина.....	724
П.2.5. Метод конечных разностей.....	726
П.2.6. Метод конечных элементов (МКЭ).....	731
Приложение 3. Единицы измерения физических величин в системе единиц СИ и СГС	735
Приложение 4. Фундаментальные физические постоянные	738
Приложение 5. Математические формулы	739
Приложение 6. Основные формулы электродинамики в системе СИ и гауссовой системе единиц.....	757
Приложение 7. Основатели классической электродинамики	765