



В. И. ЯКОВЛЕВ

# КЛАССИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

II

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ  
ВОЛНЫ.  
ЧЕТЫРЕХМЕРНАЯ  
ЭЛЕКТРОДИНАМИКА



«Инфра-Инженерия»

**В. И. Яковлев**

# **КЛАССИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА**

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ.  
ЧЕТЫРЕХМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА**

Учебное пособие

Издание второе, исправленное и дополненное

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2023

УДК 537+538  
ББК 22.313  
Я47

Рецензент:

д. ф.-м. н., заведующий кафедрой общей физики Новосибирского государственного университета *А. Г. Погосов*

**Яковлев, В. И.**

**Я47** Классическая электродинамика. Электромагнитные волны. Четырёхмерная электродинамика : учебное пособие / В. И. Яковлев. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 484 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-1301-5

Рассмотрены вопросы возникновения и распространения электромагнитных волн как в свободном пространстве, так и при наличии простейших ограничивающих поверхностей. Приводятся интерференция и дифракция электромагнитной волны, а также прохождение волны через материальную среду и происхождение рассеянной волны. Содержится релятивистское описание электродинамики и излучение релятивистских зарядов.

Для студентов технических специальностей с углублённым изучением физики и математики, а также инженерно-технических работников.

УДК 537+538  
ББК 22.313

ISBN 978-5-9729-1301-5 © Яковлев В. И., 2023  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2023  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2023

# Оглавление

Предисловие . . . . .	9
<b>ГЛАВА 7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ . . . . .</b>	<b>11</b>
7.1. Свободное электромагнитное поле. Волновое уравнение . . . . .	11
7.2. Плоские волны. Основные соотношения . . . . .	13
7.3. Пример плоской волны . . . . .	16
7.4. Уравнения Максвелла для монохроматических процессов	20
7.5. Монохроматическая плоская волна: поля, волновой вектор, фазовая скорость . . . . .	23
7.6. Монохроматическая плоская волна: поляризация . . . . .	25
7.7. Отражение и преломление электромагнитной волны на границе раздела двух сред . . . . .	31
7.8. Формулы Френеля . . . . .	34
7.9. Характерные особенности процесса отражения-преломления . . . . .	37
7.10. Просветление оптики. О диэлектрических зеркалах . . . . .	42
7.11. Предварительно о монохроматической сферической волне	49
7.12. Задачи к главе 7 . . . . .	51
<b>ГЛАВА 8. ФУРЬЕ-РАЗЛОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО- ГО ПОЛЯ . . . . .</b>	<b>53</b>
8.1. Формулы преобразования Фурье . . . . .	54
8.2. Некоторые характерные случаи фурье-преобразования . . . . .	58

8.3.	Соотношение неопределённости . . . . .	63
8.4.	О физическом содержании соотношения неопределённости	72
8.5.	Спектр случайного процесса . . . . .	75
8.6.	Преобразования Фурье для функций четырёх переменных. Уравнения Максвелла в фурье-представлении . . . . .	79
8.7.	Задачи к главе 8 . . . . .	86
<b>ГЛАВА 9. ДИСПЕРСИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН</b>		<b>89</b>
9.1.	Краткий обзор электромагнитных свойств различных сред и их механизмов дисперсии . . . . .	90
9.2.	Классическая электронная теория дисперсии . . . . .	92
9.3.	Дисперсия и волновой пакет . . . . .	97
9.4.	Метод стационарной фазы . . . . .	107
9.5.	О затухании и усилении электромагнитной волны в среде	110
9.6.	Задачи к главе 9 . . . . .	114
<b>ГЛАВА 10. СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ. РЕЗОНАТОРЫ. ВОЛНОВОДЫ</b>		<b>116</b>
10.1.	Стоячие волны . . . . .	117
10.2.	Стоячие волны при отражении от стенки конечной проводимости . . . . .	119
10.3.	Два примера электромагнитных волн в ограниченных областях . . . . .	123
10.4.	Резонаторы . . . . .	125
10.5.	Вынужденные колебания полей в щелевом резонаторе с потерями . . . . .	131
10.6.	Волноводы . . . . .	136
10.7.	Волновод с прямоугольным поперечным сечением . . . . .	140
10.8.	ТЕМ-волны . . . . .	145
10.9.	Задачи к главе 10 . . . . .	148
<b>ГЛАВА 11. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА</b>		<b>152</b>
11.1.	Вводные замечания . . . . .	152
11.2.	Уравнение эйконала . . . . .	154
11.3.	Пример прохождения волны в неоднородное полупространство . . . . .	158
11.4.	Второе приближение геометрической оптики для конкретного примера . . . . .	161

11.5. Световые лучи . . . . .	162
11.6. Примеры применения уравнения луча . . . . .	168
11.7. Принцип Ферма . . . . .	172
11.8. Гомоцентричность и астигматизм оптического пучка. Фокальные линии . . . . .	175
11.9. Мнимое изображение, создаваемое тонкой призмой . . . . .	180
11.10. Преломление луча на сферической поверхности. Параксиальное приближение . . . . .	183
11.11. О критерии параксиальности . . . . .	190
11.12. Центрированные оптические системы . . . . .	195
11.13. Тонкая линза . . . . .	199
11.14. Кардинальные элементы оптической системы . . . . .	202
11.15. Оптическая система глаза . . . . .	208
11.16. Оптические инструменты, вооружающие глаз . . . . .	211
<b>ГЛАВА 12. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН . . . . .</b>	<b>216</b>
12.1. О природе интерференции . . . . .	217
12.2. Интерференция монохроматического света . . . . .	218
12.3. Первый шаг в сторону от монохроматической идеализации	227
12.4. Квазимонохроматичность и когерентность . . . . .	229
12.5. Опыт Юнга. Качественное рассмотрение. Продольный размер когерентности . . . . .	234
12.6. Опыт Юнга. Количественный анализ . . . . .	237
12.7. Влияние размеров источника на интерференционные явления. Поперечный размер когерентности . . . . .	240
12.8. Корреляционная функция стационарного случайного волнового поля и её роль в явлении интерференции . . . . .	246
12.9. Апертура интерференции и условие применимости протяжённого источника . . . . .	253
12.10. Интерференция на тонкой плёнке. Локализация интерференционных полос . . . . .	255
12.11. Задачи к главе 12 . . . . .	267
<b>ГЛАВА 13. ДИФРАКЦИЯ . . . . .</b>	<b>273</b>
13.1. Введение . . . . .	273
13.2. Математическая постановка задачи дифракции и приближённые граничные условия Кирхгофа . . . . .	275

13.3. Решение задачи дифракции методом разложения на плоские волны . . . . .	278
13.4. Принцип Гюйгенса-Френеля. Интеграл Кирхгофа . . . . .	282
13.5. Зоны Френеля. Зонная пластинка . . . . .	290
13.6. Вывод интеграла Кирхгофа . . . . .	295
13.7. Интеграл Кирхгофа для цилиндрических волн . . . . .	301
13.8. Приближения Френеля и Фраунгофера . . . . .	303
13.9. Примеры дифракционных картин Фраунгофера . . . . .	307
13.10. Пример дифракционной картины Френеля . . . . .	311
13.11. Дифракционные решётки . . . . .	319
13.12. Дифракционная решётка как спектральный прибор . . . . .	327
13.13. Интерферометр Фабри-Перо . . . . .	329
13.14. Задачи к главе 13 . . . . .	335

## ГЛАВА 14. ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

339

14.1. Волновое уравнение для скалярного и векторного потенциалов . . . . .	339
14.2. Запаздывающие потенциалы . . . . .	340
14.3. Мультипольное разложение для запаздывающих потенциалов . . . . .	343
14.4. Примеры электромагнитных полей от гармонических источников . . . . .	348
14.5. Дипольное излучение . . . . .	352
14.6. Магнитно-дипольное и квадрупольное излучения . . . . .	358
14.7. Излучение антенны . . . . .	362
14.8. Интерференционный способ управления диаграммой направленности антенн . . . . .	366
14.9. О физическом механизме возникновения показателя преломления электромагнитных волн . . . . .	375
14.10. Рассеяние электромагнитных волн . . . . .	379
14.11. Рассеяние свободными зарядами . . . . .	381
14.12. Задачи к главе 14 . . . . .	386

<b>ГЛАВА 15. СФЕРИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ</b> . . . . .	391
15.1. Введение . . . . .	392
15.2. Электромагнитные мультипольные поля (осесимметричный случай) . . . . .	393
15.3. Сферическая стоячая волна. Сферический резонатор . . . . .	398
15.4. Замкнутая задача излучения антенны . . . . .	400
<b>ГЛАВА 16. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И ЭЛЕКТРОДИНАМИКА</b> . . . . .	408
16.1. Постулаты Эйнштейна. Инвариантность интервала. Преобразование Лоренца . . . . .	409
16.2. Четырёхмерное пространство Минковского. Четырёхмерные тензоры . . . . .	411
16.3. Метрический тензор . . . . .	417
16.4. Ковариантность уравнений электродинамики . . . . .	419
16.5. Поле равномерно движущегося заряда . . . . .	421
16.6. Тензор электромагнитного поля. Ковариантный вид уравнений Максвелла . . . . .	422
16.7. Ковариантная форма уравнения движения материальной точки . . . . .	424
16.8. Преобразование Лоренца для поля . . . . .	427
16.9. Инварианты поля . . . . .	429
16.10. Ковариантность выражения для силы Лоренца и законов сохранения . . . . .	431
16.11. Четырёхмерный волновой вектор. Эффект Доплера . . . . .	436
<b>ГЛАВА 17. ИЗЛУЧЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЗАРЯДОВ</b> 439	
17.1. Потенциалы Лиенара-Вихерта . . . . .	439
17.2. Поля движущегося заряда . . . . .	442
17.3. Четырёхвектор энергии-импульса излучения релятивистской частицы . . . . .	448
17.4. Угловое распределение излучения . . . . .	453
17.5. Физический смысл мощности излучения . . . . .	456
17.6. Торможение излучением . . . . .	458
17.7. Сила торможения и баланс энергии-импульса при излучении . . . . .	464



17.8. Сила торможения излучением для заряда, движущегося в заданном электромагнитном поле . . . . .	468
17.9. Излучение заряда, движущегося в однородном электри- ческом поле при $\mathbf{v} \parallel \mathbf{E}$ . . . . .	470
17.10. Синхротронное излучение . . . . .	474
<b>Библиографический список . . . . .</b>	<b>481</b>