

УДК 538.3 (075.8)

ББК 32.88

П29

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор *Б. Д. Мануилов*,
доктор физ.-мат. наук, профессор *А. М. Петров*

Петров Б. М.

П29 Электродинамика и распространение радиоволн. Часть 1 – «Электродинамика». Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2017. – 296 с.; ил.

ISBN 978-5-9912-0520-7.

Систематически и подробно рассмотрено решение уравнений электродинамики в дифференциальной форме как решение волнового уравнения или уравнения Гельмгольца для векторных потенциалов в задачах возбуждения электромагнитных полей различными источниками в неограниченном однородном пространстве.

Подробно разобраны параметры полей сферической, цилиндрической и плоской волн, поверхностной волны. Изложены основные теоремы и принципы электродинамики; основы теории открытых и закрытых направляющих систем и объёмных резонаторов; рассмотрены электромагнитно-волновые явления, возникающие при отражении плоской волны от плоской поверхности раздела сред, и явления рассеяния и дифракции электромагнитного поля, соответствующие прикладным задачам радиотехники. Особое внимание уделено физической интерпретации явлений электромагнетизма. Все разделы книги снабжены контрольными вопросами.

Для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и «Радиотехника» (квалификация «бакалавр»).

ББК 32.88

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

Учебное издание

Петров Борис Михайлович

Электродинамика и распространение радиоволн

Часть 1 – «Электродинамика»

Учебное пособие для вузов

Тиражирование книги начато в 2017 г.

Все права защищены.

Любая часть этого издания не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения правообладателя.

© ООО «Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком»
www.techbook.ru

© Б.М. Петров

Оглавление

Предисловие	3
Введение	6
В.1. Определения.....	6
В.2. О точке наблюдения. О математическом моделировании	9
В.3. Об истории электромагнетизма.....	10
Раздел 1. Система уравнений электродинамики	13
1.1. Электрический заряд. Плотности заряда	13
1.2. Закон Гаусса. Обобщенный закон Гаусса. Вектор электрической индукции Материальное уравнение диэлектрической среды	15
1.3. Третье уравнение Максвелла (УМ-3)	16
1.4. Плотности тока. Ток. Закон сохранения электрического заряда	16
1.4.1. Плотность объемного тока. Ток	16
1.4.2. Закон сохранения электрического заряда	17
1.4.3. Плотности поверхностного и линейного токов	18
1.5. Векторы магнитного поля. Закон замкнутости силовых линий магнитного поля. Четвертое уравнение Максвелла (УМ-4). Закон Ампера в магнитостатике .	18
1.5.1. Вектор магнитной индукции	18
1.5.2. Вектор напряженности магнитного поля. Обобщенный закон Ампера в магнитостатике	19
1.5.3. Магнитная проницаемость вещества	20
1.6. Закон полного тока Ампера (УМ-1)	21
1.7. Обобщенный закон ЭМ индукции Фарадея–Максвелла (УМ-2)	21
1.8. Закон Ома в дифференциальной форме. Обобщенный закон Ома	22
1.9. Закон Джоуля–Ленца. Источники ЭМ Поля	23
1.10. Нелинейные среды. Частотная дисперсия среды	24
1.11. Система уравнений Максвелла. Система уравнений электродинамики	26
1.11.1. УМ для произвольной среды	26
1.11.2. Полная система уравнений электродинамики	28

1.12. Векторный и скалярный потенциалы. Волновое уравнение	29
1.12.1. Электрические векторный и скалярный потенциалы	29
1.12.2. Волновое уравнение	31
1.13. Уравнения электродинамики в комплексной форме	31
1.13.1. Метод комплексных амплитуд (КА)	31
1.13.2. УМ в комплексной форме. Комплексная форма уравнений электродинамики	32
1.13.3. Комплексная диэлектрическая проницаемость вещества	33
1.14. Уравнение баланса мощностей для комплексных амплитуд векторов поля	34
1.14.1. Энергетические характеристики в теории цепей	34
1.14.2. Энергетические характеристики ЭМ поля	35
1.14.3. Уравнение баланса мощностей для линейной изотропной среды, не имеющей гистерезиса	36
1.15. Классификация сред. Математические модели	37
1.16. Тангенс угла электрических потерь	38
1.17. Комплексная амплитуда электрического векторного потенциала. Уравнение Гельмгольца	39
1.17.1. Уравнение Гельмгольца	39
1.17.2. Комплексные амплитуды векторов напряженностей	40
1.18. Коэффициенты распространения, фазы и затухания	41
1.19. Уравнения Максвелла для векторов ЭМ поля, возбуждаемого фиктивными магнитными зарядами и токами. Принцип перестановочной двойственности	41
1.19.1. Уравнения Максвелла для векторов ЭМ поля, возбуждаемого фиктивными сторонними магнитными зарядами и токами	41
1.19.2. Принцип перестановочной двойственности	43
1.19.3. Обозначения плотностей поверхностных и линейных фиктивных сторонних магнитных зарядов и токов	43
1.20. Векторы напряженностей поля, возбуждаемого сторонними электрическими и фиктивными магнитными токами и зарядами	43
Контрольные вопросы	44
Раздел 2. Электромагнитное поле в неограниченном пространстве	46
2.1. Математические модели излучателей	46
2.1.1. Область стороннего тока	46
2.1.2. Определения	47
2.1.3. Математическая модель прямолинейного тонкого вибратора	47

2.1.4. Распределение плотности линейного тока	48
2.1.5. Математическая модель рамки электрического тока	49
2.2. Решение неоднородного уравнения Гельмгольца	50
2.2.1. Решение уравнения Гельмгольца для электрического векторного потенциала Функция источника (Грина)	50
2.2.2. Решение уравнения Гельмгольца для магнитного векторного потенциала	53
2.3. Векторы напряженностей ЭМ поля.....	53
2.4. Поле прямолинейных излучателей в зоне излучения	58
2.4.1. Составляющие векторов напряженностей поля. Разность хода лучей	58
2.4.2. Характеристическое сопротивление неограниченного пространства	60
2.5. Характеристика направленности излучателя	60
2.6. Сферическая волна. Параметры ЭМ поля	61
2.6.1. Вектор Пойнтинга. Продольное направление. Мгновенные значения E_θ и H_φ	61
2.6.2. Волновая функция. Фронт волны. Сферическая волна. Фазовая скорость волны	62
2.6.3. Параметры ЭМ поля в среде с тепловыми потерями	64
2.7. Параметры ЭМ поля в реальных диэлектрике и проводнике	66
2.7.1. Реальный диэлектрик	66
2.7.2. Реальный проводник	67
2.8. Элементарный электрический вибратор	67
2.8.1. Определения. Распределения плотностей тока и заряда вдоль вибратора	67
2.8.2. Составляющие векторов напряженностей ЭМ поля. Зоны	70
2.8.3. Характеристика и диаграмма направленности	71
2.8.4. Силовые линии электрического и магнитного полей	72
2.8.5. Мощность излучения. Сопротивление излучения	74
2.9. Поле рамки электрического тока. Элементарная рамка электрического тока	75
2.9.1. Векторные потенциалы	75
2.9.2. Поле внутри элементарной рамки	76
2.9.3. Поле снаружи элементарной рамки при $R \gg a$	78
2.9.4. Поле в ближней зоне элементарной рамки	78
2.9.5. Поле в дальней зоне элементарной рамки	79
2.10. Поле элементарного магнитного вибратора	80
2.11. Поле элементарной магнитной рамки	81
2.12. Электрическая и магнитная волны.....	82
2.13. Поверхностная и цилиндрическая волны	82
2.13.1. Поверхностная волна	84

2.13.2. Цилиндрическая волна	85
2.14. Поле бесконечного плоского листа тока. Плоская волна	87
2.14.1. Поверхностная (медленная) волна	88
2.14.2. Плоская волна	89
2.15. Поле плоского листа электрического и фиктивного магнитного тока	90
2.15.1. Векторы напряженностей ЭМ поля, возбуждаемого электрическими токами	91
2.15.2. Векторы напряженностей ЭМ поля, возбуждаемого магнитными токами	93
2.15.3. Векторы напряженностей полного поля	94
2.16. Характеристика направленности прямоугольного плоского листа.....	95
2.17. Элементарный поверхностный излучатель (элемент Гюйгенса)	97
2.18. Линейная и вращающаяся поляризации поля	98
Контрольные вопросы	101
Раздел 3. Теоремы и принципы электродинамики	103
3.1. Граничные условия на поверхностях раздела реальных сред.....	103
3.1.1. Граничные условия для нормальных составляющих векторов поля	104
3.1.2. Граничные условия для касательных составляющих векторов напряженностей полей	105
3.1.3. Граничные условия на ребре	106
3.2. Граничные условия на поверхности идеально проводящего тела	107
3.2.1. Граничные условия для нормальных составляющих векторов индукций и напряженностей поля	107
3.2.2. Граничные условия для касательных к поверхности составляющих векторов Е и Н	107
3.2.3. Поведение силовых линий ЭП и МП у поверхности идеального проводника	108
3.3. Лемма Лоренца.....	110
3.3.1. Дифференциальная форма леммы Лоренца	110
3.3.2. Лемма Лоренца в интегральной форме	111
3.3.3. Теорема единственности решений задач электродинамики. Условия излучения	111
3.3.4. Внутренняя граничная задача ЭД	112
3.3.5. Внешняя граничная задача ЭД	113
3.3.6. Условия излучения	114

3.4. Принцип эквивалентности плотностей поверхностных электрического и магнитного токов и касательных к поверхности составляющих векторов напряженностей поля	115
3.4.1. Принцип эквивалентных поверхностных токов	118
3.5. Принцип Гюйгенса и интеграл Кирхгофа	120
3.5.1. Принцип Гюйгенса-Френеля	120
3.5.2. Интеграл Кирхгофа	121
3.6. Теорема взаимности	123
3.6.1. Математическая формулировка теоремы взаимности	123
3.6.2. Взаимные сопротивления вибраторов	123
3.6.3. Взаимость положений элементарных магнитных вибраторов	124
3.6.4. ЭМ связь двух элементарных вибраторов	124
Контрольные вопросы	125
Раздел 4. Электромагнитные явления у плоской границы раздела двух сред	127
4.1. Падение плоской волны на плоскую границу раздела двух сред	127
4.2. Волновые явления при отражении ЭМ поля от идеально проводящего полупространства, ограниченного плоской поверхностью раздела сред	132
4.3. Явление полного преломления и полного отражения	134
4.3.1. Явление полного преломления	134
4.3.2. Явление полного отражения. Поверхностная волна	135
4.4. Графики модулей и фаз коэффициентов отражения	137
4.5. Импедансные граничные условия	139
4.6. Сопротивление плоского проводника при поверхностном эффекте	141
4.7. Метод зеркальных изображений	143
4.7.1. Постановка задачи для нити синфазного магнитного тока	143
4.7.2. Постановка задачи для нити синфазного электрического тока	145
4.7.3. Анализ поля в случае, когда нижнее полупространство — идеальный проводник	147
4.7.4. Токи зеркальных источников	148
4.7.5. Случай реальной среды в нижнем полупространстве	149
Контрольные вопросы	150
Раздел 5. Основы теории направляющих систем	151
5.1. Определения	151
5.2. Разделение ЭМ поля на поля волн электрического и магнитного типов. Характеристические сопротивления	154

5.2.1. Разделение поля в ДСК	154
5.2.2. Векторная форма представления напряженностей полей E -волн и H -волн	155
5.2.3. Характеристические сопротивления E - и H -волн ...	155
5.3. Граничные задачи для продольных составляющих векторов напряженностей поля	156
5.3.1. Граничные задачи о возбуждении поля	156
5.3.2. Граничные задачи о возможности существования полей направляемых волн электрического и магнитного типов	158
5.3.3. Распространяющиеся направляемые волны. Нераспространяющиеся «волны». Параметры направляющих систем	160
5.4. Мощность, переносимая полем через поперечное сечение направляющей системы	161
5.5. Коэффициенты затухания векторов поля	162
5.5.1. Коэффициент затухания векторов поля в направляющей системе за счет джоулевых потерь в металле	162
5.5.2. Коэффициент затухания векторов поля за счет тепловых потерь в диэлектрике	165
5.5.3. Единицы измерения коэффициента затухания	166
Контрольные вопросы	167
Раздел 6. Электромагнитные волны в закрытых направляющих системах	168
6.1. Физические соображения о возбуждении типов волн в волноводе	168
6.2. Граничная задача о возможности существования поля волн электрического типа в прямоугольном волноводе	170
6.3. Граничная задача о возможности существования поля волн магнитного типа в прямоугольном волноводе ..	173
6.4. Векторы напряжённостей волн электрического и магнитного типов в прямоугольном волноводе	175
6.4.1. Поле E_{mn} -волн	175
6.4.2. Поле H_{mn} -волн	177
6.4.3. Парциальные волны	178
6.4.4. Параметры поля E_{mn} - и H_{mn} -волн	180
6.5. Волна основного типа в прямоугольном волноводе ..	182
6.5.1. Параметры H_{10} -волны	182
6.5.2. Силовые линии ЭП и МП H_{10} -волны	183
6.6. Поверхностные токи на внутренних стенках прямоугольного волновода. Щели	185
6.6.1. Поверхностный электрический ток	185
6.6.2. Щели	186

6.7. Физические соображения о построении силовых линий полей E_{mn} -волн и H_{mn} -волн	187
6.8. Круглый волновод	190
6.8.1. Задачи о возможности существования E_{mn} -волн	192
6.8.2. Граничная задача о возможности существования H_{mn} - волн	194
6.8.3. Поперечные составляющие векторов напряженностей	195
6.8.4. Параметры. Критическая длина волны. Волна основ- ного типа	195
6.8.5. Структура силовых линий полей	196
6.9. Коаксиальная линия	197
6.9.1. Волны типа E_{mn}	198
6.9.2. Волны типа H_{mn}	200
6.9.3. T -волна	200
6.9.4. Волновое сопротивление	201
Контрольные вопросы	202
Раздел 7. Электромагнитные волны в открытых на- правляющих системах	
7.1. Симметричные линии	204
7.1.1. Антифазная T -волна	206
7.1.2. Экранированная двухпроводная линия	208
7.2. Диэлектрическая пластина	208
7.2.1. Граничная задача о возможности существования поля E_n -волн	211
7.2.2. О возможности существования направляемых H_{0n} - волн	214
7.3. Круглый диэлектрический волновод	215
7.3.1. Граничная задача о возможности распространения ЭМ волн в направляющей системе	215
7.3.2. Критические длины волн	219
7.3.3. Мощность. Коэффициент затухания	221
7.3.4. Силовые линии полей	221
7.4. Однопроводная линия поверхностной волны	223
7.4.1. Постановка и решение граничной задачи	223
7.4.2. Провод, покрытый слоем диэлектрика	224
7.5. Сопротивление прямолинейного цилиндрического про- вода. Поверхностный эффект	225
7.5.1. Поверхностный эффект	225
7.5.2. Способ уменьшения сопротивления переменному току	227
7.6. Понятие о квазиоптических направляющих системах	227
7.6.1. О параметрах закрытых волноводов	227
7.6.2. Линзовая линия	228
7.6.3. Зеркальная линия	228

7.7. Понятие об оптических волноводах	229
7.8. Полосковые волноводы	231
Контрольные вопросы	234
Раздел 8. Электромагнитные поля в объемных резонаторах	235
8.1. Параметры. Определения. Добротность	235
8.1.1. Параметры. Определения	235
8.1.2. Понятия об устройствах ввода ЭМ энергии в резонатор и вывода её из резонатора	237
8.1.3. Добротность	239
8.1.4. Мощность джоулевых потерь в закрытом резонаторе	239
8.2. Прямоугольный объёмный резонатор	240
8.2.1. Граничная задача о возможности существования поля электрического типа в прямоугольном резонаторе	241
8.2.2. Граничная задача о возможности существования поля магнитного типа в прямоугольном резонаторе	243
8.2.3. Собственные (резонансные) частоты	244
8.2.4. Основной тип колебаний	246
8.2.5. Собственная добротность резонатора	248
8.3. Собственные колебания цилиндрического резонатора	248
8.3.1. Граничная задача о возможности существования поля колебаний электрического типа	248
8.3.2. Граничная задача о возможности существования ЭМ поля колебаний магнитного типа	251
8.3.3. Добротность	252
8.4. Коаксиальный резонатор. Резонаторы на основе отрезков направляющих систем с T -волной	253
8.4.1. Граничные задачи о возможности существования полей E_{mnq} - и H_{mnq} -колебаний	253
8.4.2. Собственные частоты резонаторов на основе отрезков направляющих систем, в которых существует T -волна	255
8.5. Эквивалентные параметры объемных резонаторов. Резонаторы с укорачивающей емкостью	255
8.6. Тороидальный и магнетронный резонаторы	257
8.6.1. Квазистационарные резонаторы	257
8.6.2. Магнетронный резонатор	258
8.7. Диэлектрические резонаторы	259
8.8. Понятие об открытых (квазиоптических) резонаторах	260
Контрольные вопросы	263
Раздел 9. Дифракция электромагнитных волн	265
9.1. Характеристика задач дифракции	265
9.2. Эффективная площадь рассеяния объекта. Мощность на входе приемной антенны	267
9.2.1. Определение эффективной площади рассеяния	267

9.2.2. Мощность на входе приёмной антенны	268
9.3. Рассеяние электромагнитного поля цилиндром	269
9.3.1. Граничная задача для бесконечного кругового цилиндра	269
9.3.2. Характеристика и диаграмма рассеяния	272
9.4. Дифракция электромагнитного поля на цилиндре и шаре	273
9.4.1. Характеристика и диаграмма направленности	273
9.4.2. О дифракции поля на шаре	274
9.5. Дифракция Френеля. Область пространства, существующая при распространении радиоволн	275
9.5.1. Зоны Френеля	279
9.5.2. Открытые и закрытые трассы	281
Контрольные вопросы	283
Основные обозначения и сокращения	283
Литература	285