

УДК 537.86  
ББК 22.336  
С28

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор *В. И. Гусевский*,  
доктор техн. наук, профессор *А. А. Елизаров*.

**Седов В. М., Гайнутдинов Т. А.**

**С28** Электромагнитные поля и волны. Учебное пособие для вузов /  
Под ред. профессора В. В. Чебышева. – 2-е изд., перераб. и доп. –  
М.: Горячая линия – Телеком, 2020. – 282 с.: ил.

**ISBN 978-5-9912-0781-2.**

С позиции классической, макроскопической электродинамики рассмотрены основные закономерности поведения электромагнитных полей и волн. Приведены основные методы расчета взаимодействия электромагнитных волн с плоской границей раздела сред, а также начальные сведения из теории дифракции и элементарных излучателей. Предложен алгоритм расчета направляемых волн в линиях передачи. Рассмотрены основные классы этих волн и оценены их дисперсионные свойства. Рассчитаны характеристики различных типов волн. Оценены различные режимы работы линий передачи конечной длины и схемы построения объемных резонаторов, использующие конечные отрезки этих линий.

Для студентов, обучающихся по направлению 11.03.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», будет полезно студентам телекоммуникационных и радиотехнических специальностей, изучающим дисциплину «Электромагнитные поля и волны».

**ББК 22.336**

Учебное издание

Седов Владимир Михайлович, Гайнутдинов Тимур Аншарович

Электромагнитные поля и волны

Учебное пособие для вузов

2-е издание, переработанное и дополненное

Тиражирование книги начато в 2018 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](http://www.techbook.ru)

© В. М. Седов, Т. А. Гайнутдинов

# Содержание

Предисловие .....	3
Введение .....	5
Глава 1. Уравнения электромагнитного поля .....	10
1.1. Векторы электромагнитного поля .....	10
1.2. Электромагнитные характеристики среды .....	11
1.3. Интегральные уравнения электромагнитного поля .....	14
1.4. Дифференциальные уравнения электромагнитного поля .....	15
1.5. Уравнения непрерывности (закон сохранения заряда) ..	17
1.6. Сторонние источники электромагнитного поля .....	18
1.7. Полная система уравнений Максвелла .....	18
1.8. Классификация электромагнитных полей .....	19
1.9. Граничные условия .....	20
Глава 2. Уравнения Максвелла для гармонического электромагнитного поля .....	24
2.1. Метод комплексных амплитуд .....	24
2.2. Уравнения Максвелла в комплексных амплитудах .....	25
2.3. Волновые уравнения для комплексных амплитуд векторов электромагнитного поля .....	28
2.4. Волновые уравнения для потенциалов монохроматического электромагнитного поля .....	30
Глава 3. Основные теоремы и принципы в теории электромагнитного поля .....	33
3.1. Теорема Умова–Пойнтинга .....	33
3.2. Уравнение баланса комплексной мощности .....	35
3.3. Теорема единственности решения для краевых задач электромагнитного поля .....	37
3.4. Перестановочная двойственность уравнений Максвелла. Принцип перестановочной двойственности .....	41
3.5. Принцип эквивалентности .....	42
Глава 4. Плоские волны в однородной изотропной среде .....	44
4.1. Плоские волны в среде без потерь .....	44
4.2. Плоские волны в среде с потерями .....	45
4.3. Дисперсия плоских волн .....	47
4.4. Поляризация электромагнитных волн .....	49
Глава 5. Излучение электромагнитных волн .....	51

5.1. Постановка задачи .....	51
5.2. Элементарный электрический излучатель .....	52
5.3. Элементарный магнитный излучатель .....	56
5.4. Элемент Гюйгенса.....	58
<i>Глава 6. Волновые явления у границы раздела двух сред .....</i>	<i>61</i>
6.1. Законы Снеллиуса. Формулы Френеля.....	61
6.2. Волны у границы раздела с идеальным проводником...	65
6.3. Волны у границы раздела двух диэлектриков .....	67
6.4. Волны у границы раздела с поглощающей средой. Явление поверхностного эффекта .....	72
6.5. Импедансные граничные условия Леонтовича-Щукина. Потери энергии в проводнике .....	76
<i>Глава 7. Дифракция электромагнитных волн .....</i>	<i>78</i>
7.1. Строгая постановка задачи дифракции .....	78
7.2. Приближение геометрической оптики .....	79
7.3. Электростатическое приближение.....	83
7.4. Дифракция плоской электромагнитной волны на отверстии .....	84
<i>Глава 8. Направляемые волны в линиях передачи.....</i>	<i>91</i>
8.1. Типы линий передачи.....	91
8.2. Общий метод расчёта структуры полей в регулярных линиях передачи .....	93
8.3. Типы направляемых волн.....	95
8.4. Фазовая скорость направляемых волн .....	96
8.5. Направляемые волны в экранированных волноводах...	96
8.6. Направляемые волны в диэлектрическом волноводе ...	98
8.7. Направляемые волны ТЕМ .....	99
<i>Глава 9. Электромагнитные волны в полых металлических волноводах .....</i>	<i>102</i>
9.1. Электромагнитные волны в прямоугольном металлическом волноводе.....	102
9.2. Электромагнитные волны в круглом металлическом волноводе .....	118
9.3. Способы возбуждения электромагнитных волн в прямоугольном и круглом металлическом волноводе.....	123
9.4. Волноводы сложной формы .....	129
<i>Глава 10. Электромагнитные волны в линиях передачи с ТЕМ-волной .....</i>	<i>132</i>
10.1. Основные параметры и методы нахождения структуры поля в линиях передачи с ТЕМ-волной .....	132

10.2. Электромагнитные волны в коаксиальной линии .....	133
10.3. Электромагнитные волны в двухпроводной и четырехпроводной линии .....	139
10.4. Электромагнитные волны в полосковой линии .....	142
Глава 11. Электромагнитные волны в линиях поверхностной волны .....	147
11.1. Электромагнитные волны в планарном диэлектрическом волноводе .....	149
11.2. Электромагнитные волны в круглом диэлектрическом волноводе .....	154
11.3. Электромагнитные волны в волоконно-оптической линии связи .....	175
11.4. Электромагнитные волны в однопроводной линии .....	195
Глава 12. Методы теории цепей при анализе электромагнитного поля в нерегулярных линиях передачи конечной длины .....	201
12.1. Нерегулярная линия передачи и ее эквивалентная схема	201
12.2. Основные параметры эквивалентной длинной линии ...	208
12.3. Влияние режима работы линии на ее энергетические характеристики .....	215
12.4. Трансформирующие свойства отрезка линии передачи	218
12.5. Узкополосное согласование в линиях передачи .....	227
Глава 13. Электромагнитные волны в объемных резонаторах .	237
13.1. Общие свойства объемных резонаторов .....	237
13.2. Электромагнитное поле в прямоугольном резонаторе ..	244
13.3. Электромагнитное поле в цилиндрическом резонаторе .	250
13.4. Резонаторы на основе отрезков линий передачи с ТЕМ-волной .....	254
13.5. Оптические резонаторы .....	257
13.6. Возбуждение и схемы подключения объемных резонаторов .....	261
Приложение 1. Элементы векторного анализа .....	269
Приложение 2. Специальные уравнения и их решения .....	271
Приложение 3. Цилиндрические функции целых порядков .	272
Список основных обозначений .....	276
Литература .....	278