



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Брянский государственный технический университет

Л.А. Потапов

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ
РАДИОВОЛН**

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

Брянск
ИЗДАТЕЛЬСТВО БГТУ
2009

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие предназначено для изучения теоретической части дисциплины «Электродинамика и распространение радиоволн» и соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта специальности 210304 «Радиоэлектронные системы».

В учебном пособии рассмотрены основные уравнения электродинамики, особенности возбуждения и распространения радиоволн, модели и методы расчета радиотрасс.

Для лучшего усвоения понятий и терминов, характеризующих электромагнитное поле, общие сведения о макроскопической электродинамике, электростатическом, магнитном и электрическом поле постоянных токов вынесены в отдельные главы, приведены примеры, в конце каждой главы даны вопросы для самопроверки.

Для переменного электромагнитного поля получены уравнения Максвелла и Гельмгольца в комплексной форме, рассмотрены особенности распространения, отражения и преломления плоских волн, образования E -, H -, T -волн в направляющих системах, возбуждения и распространения радиоволн. При этом более подробно рассмотрено распространение радиоволн в свободном пространстве, вблизи поверхности Земли, тропосфере и ионосфере.

В учебном пособии больше внимания уделено физической интерпретации явлений электромагнетизма. С целью уменьшения объема учебного пособия исключены подробные выводы отдельных уравнений. Эти выводы студент при необходимости может найти в литературе, перечень которой приведен в конце пособия.

В приложении приведены уравнения векторного анализа в сферической и цилиндрической системе координат и рассмотрены особенности электромагнитных волн в анизотропных средах. Эта тема рекомендуется студентам для самостоятельного изучения.

Учебное пособие предназначено для студентов очной формы обучения специальности 210304 «Радиоэлектронные системы», а также может быть использовано студентами других электротехнических специальностей.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАКРОСКОПИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ | 4 |
| 1.1. Векторы электромагнитного поля | 4 |
| 1.2. Уравнения Максвелла | 8 |
| 1.3. Энергия электромагнитного поля | 11 |
| Вопросы для самопроверки | 14 |
| ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ | 15 |
| 2.1. Основные определения | 15 |
| 2.2. Граничные условия | 18 |
| 2.3. Теорема единственности решения | 22 |
| 2.4. Графический метод построения картины плоскопараллельного поля | 22 |
| 2.5. Метод зеркальных изображений | 24 |
| 2.6. Определение потенциала по заданному распределению заряда. Принцип суперпозиции | 25 |
| 2.7. Потенциал и напряженность электрического поля диполя | 27 |
| 2.8. Энергия электростатического поля | 28 |
| Вопросы для самопроверки | 31 |
| ГЛАВА 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ И МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННЫХ ТОКОВ | 32 |
| 3.1. Электрическое поле постоянных токов | 32 |
| 3.2. Аналогия электрического поля в проводящей среде с электростатическим полем | 33 |
| 3.3. Магнитное поле постоянных токов | 36 |
| 3.4. Векторный потенциал магнитного поля | 38 |
| 3.5. Граничные условия на поверхности раздела двух сред с различными магнитными проницаемостями | 40 |
| 3.6. Поле прямого провода (прямолинейного тока) | 42 |
| 3.7. Графический метод построения картины поля | 45 |
| 3.8. Магнитное экранирование | 46 |
| 3.9. Магнитная энергия постоянного тока | 47 |
| Вопросы для самопроверки | 48 |
| ГЛАВА 4. ПЕРЕМЕННОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ | 49 |
| 4.1. Уравнения Максвелла в комплексной форме | 49 |
| 4.2. Волновые уравнения | 51 |

| | |
|---|------------|
| 4.3. Лемма Лоренца. Теорема (принцип) взаимности..... | 53 |
| 4.4. Принцип перестановочной двойственности..... | 58 |
| 4.5. Основные методы решения задач электродинамики..... | 58 |
| 4.5.1 Формулировка задач электродинамики..... | 59 |
| 4.5.2 Точные методы решения..... | 59 |
| 4.5.3 Приближенные методы решения..... | 61 |
| Вопросы для самопроверки..... | 64 |
| ГЛАВА 5. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛОСКОЙ ВОЛНЫ..... | 65 |
| 5.1. Плоские волны в вакууме..... | 65 |
| 5.2. Плоские волны в проводящей среде..... | 69 |
| 5.3. Плоские электромагнитные волны в изотропных поглощающих средах..... | 73 |
| 5.4. Экранирование и высокочастотный нагрев металлических деталей и несовершенных диэлектриков..... | 77 |
| Вопросы для самопроверки..... | 78 |
| ГЛАВА 6. ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ПЛОСКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН..... | 79 |
| 6.1. Переход плоской линейно поляризованной волны из одной среды в другую при нормальном падении..... | 79 |
| 6.2. Наклонное падение плоской линейно поляризованной волны на границу раздела двух диэлектриков..... | 81 |
| 6.3. Полное преломление (отсутствие отраженной волны) и полное отражение (отсутствие преломленной волны) | 83 |
| 6.4. Дифракция электромагнитных волн..... | 86 |
| 6.5. Устранение отражения электромагнитных волн | 88 |
| Вопросы для самопроверки..... | 89 |
| ГЛАВА 7. НАПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ..... | 90 |
| 7.1 Волноводы..... | 90 |
| 7.2. Линии передачи с волнами типа T | 97 |
| 7.3. Аналогия между волноводом и линией с распределенными параметрами..... | 103 |
| 7.4. Замедляющие структуры..... | 105 |
| 7.5. Объемные резонаторы..... | 107 |
| Вопросы для самопроверки..... | 114 |
| ГЛАВА 8. ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН..... | 115 |
| 8.1 Уравнения Максвелла для области, содержащей источники. Неоднородные волновые уравнения..... | 115 |
| 8.2 Электродинамические потенциалы..... | 116 |

| | |
|---|------------|
| 8.3 Запаздывающие электродинамические потенциалы..... | 117 |
| 8.4 Элементарный электрический излучатель..... | 120 |
| 8.5 Исследование поля электрического диполя..... | 123 |
| 8.6 Элементарный магнитный излучатель..... | 127 |
| 8.7 Элемент Гюйгенса..... | 130 |
| 8.8. Способы возбуждения полей в волноводах..... | 131 |
| 8.9. Интерференция и дифракция электромагнитных волн..... | 133 |
| Вопросы для самопроверки..... | 135 |
| ГЛАВА 9. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН..... | 136 |
| 9.1. Краткая характеристика радиотрасс..... | 136 |
| 9.2. Излучение электромагнитных волн в свободное пространство..... | 138 |
| 9.3. Распространение электромагнитных волн вблизи поверхности Земли..... | 148 |
| 9.3.1. Поле излучателя, поднятого над плоской поверхностью (первая модель)..... | 151 |
| 9.3.2. Поле излучателя, поднятого над сферической поверхностью (вторая модель)..... | 154 |
| 9.3.3. Поле вертикального электрического вибратора, расположенного вблизи земной поверхности..... | 155 |
| 9.3.4. Поле в зоне тени (третья модель)..... | 159 |
| 9.4. Тропосферные волны..... | 160 |
| 9.4.1. Диэлектрическая проницаемость и показатель преломления тропосферы..... | 160 |
| 9.4.2. Рефракция электромагнитного поля в тропосфере..... | 163 |
| 9.4.3. Дальнее тропосферное распространение радиоволн..... | 166 |
| 9.4.4. Затухание радиоволн в тропосфере..... | 168 |
| 9.5. Ионосферная волна..... | 169 |
| 9.5.1. Строение ионосферы..... | 170 |
| 9.5.2. Электрические параметры ионосферы..... | 171 |
| 9.5.3. Условия распространения волн в ионосфере..... | 174 |
| 9.5.4. Траектории радиоволн в ионосфере без учета влияния магнитного поля Земли..... | 175 |
| 9.5.5. Влияние магнитного поля Земли на распространение радиоволн в ионосфере..... | 178 |
| 9.6. Особенности распространения радиоволн различных диапазонов..... | 180 |

| | |
|---|------------|
| 9.6.1. Распространения волн ОВЧ–ГВЧ-диапазонов..... | 179 |
| 9.6.2. Особенности распространения волн ВЧ-диапазона | 181 |
| 9.6.3. Особенности распространения волн СЧ-, НЧ- и ОНЧ-диапазонов..... | 183 |
| 9.6.4. Помехи радиоприему. Уравнение связи..... | 184 |
| 9.6.5. Понятие об электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств..... | 187 |
| Вопросы для самопроверки..... | 189 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ И РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ..... | 190 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ..... | 191 |