

В.М. Павлов

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВОЛНЫ

*Учебное пособие*

*Допущено*

*Федеральным агентством железнодорожного транспорта  
в качестве учебного пособия для студентов вузов  
железнодорожного транспорта*

Москва

2023

---

---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                    |            |
|--------------------------------------------------------------------|------------|
| Введение.....                                                      | 7          |
| <b>1. Основные характеристики электромагнитного поля .....</b>     | <b>15</b>  |
| 1.1. Уравнения Максвелла .....                                     | 18         |
| 1.2. Граничные условия.....                                        | 26         |
| 1.3. Сторонние токи и заряды .....                                 | 35         |
| 1.4. Уравнения Максвелла в комплексной форме .....                 | 36         |
| 1.5. Энергетические соотношения в электромагнитном поле ....       | 40         |
| 1.6. Теорема о единственности решения уравнения Максвелла ..       | 47         |
| 1.7. Теорема взаимности .....                                      | 50         |
| <b>2. Излучение электромагнитных волн .....</b>                    | <b>54</b>  |
| 2.1. Решение уравнений электромагнитного поля .....                | 54         |
| 2.2. Запаздывающие потенциалы.....                                 | 58         |
| 2.3. Векторный и скалярный потенциалы гармонических<br>полей ..... | 63         |
| 2.3. Элементарный электрический вибратор .....                     | 64         |
| 2.4. Зоны излучения ЭЭВ .....                                      | 69         |
| 2.5. Диаграммы направленности ЭЭВ.....                             | 75         |
| 2.6. Излучение электромагнитной энергии ЭЭВ .....                  | 79         |
| 2.7. Перестановочная двойственность уравнений Максвелла ....       | 86         |
| 2.8. Элементарный магнитный вибратор .....                         | 88         |
| 2.9. Элементарная рамка и щель .....                               | 93         |
| 2.10. Элемент Гюйгенса.....                                        | 97         |
| 2.11. Система однородных излучателей.....                          | 101        |
| <b>3. Плоские электромагнитные волны.....</b>                      | <b>106</b> |
| 3.1. Однородная плоская волна в среде без потерь .....             | 107        |
| 3.2. Распространение плоских волн в проводящей среде .....         | 112        |
| 3.3. Поляризация плоских волн .....                                | 121        |

|                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.4. Отражение и преломление плоских электромагнитных волн .....                 | 127        |
| 3.5. Падение плоской волны на границу раздела диэлектриков .....                 | 130        |
| 3.6. Полное прохождение волны через границу раздела диэлектриков .....           | 135        |
| 3.7. Плоские неоднородные волны .....                                            | 138        |
| 3.8. Плоская волна на границе диэлектрика и среды с потерями .....               | 144        |
| 3.9. Поверхностный эффект .....                                                  | 147        |
| <b>4. Электромагнитные волны в атмосфере Земли .....</b>                         | <b>152</b> |
| 4.1. Строение атмосферы Земли .....                                              | 153        |
| 4.2. Распространение радиоволн (РРВ) в свободном пространстве .....              | 156        |
| 4.3. Множитель ослабления и коэффициент поглощения .....                         | 160        |
| 4.4. Область пространства, существенная для прохождения радиоволн .....          | 162        |
| 4.5. Распространение сантиметровых, миллиметровых и децимиллиметровых волн ..... | 168        |
| 4.6. Распространение дециметровых волн .....                                     | 169        |
| 4.7. Распространение метровых волн .....                                         | 171        |
| 4.8. Распространение декаметровых волн .....                                     | 174        |
| 4.9. Распространение гектометровых, километровых и мириаметровых волн .....      | 176        |
| <b>5. Длинные линии .....</b>                                                    | <b>179</b> |
| 5.1. Особенности длинных линий .....                                             | 179        |
| 5.2. Параметры длинных линий .....                                               | 184        |
| 5.3. Телеграфные уравнения .....                                                 | 186        |
| 5.4. Вторичные параметры длинных линий .....                                     | 189        |
| 5.5. Падающие, отраженные и стоячие волны .....                                  | 193        |
| 5.6. Входное сопротивление линии .....                                           | 196        |
| 5.7. Резонансные свойства отрезков длинных линий .....                           | 197        |
| 5.8. Круговая диаграмма полных сопротивлений .....                               | 205        |
| <b>6. Радиоволноводы .....</b>                                                   | <b>219</b> |
| 6.1. Классы направляемых волн .....                                              | 219        |
| 6.2. Решение уравнений Максвелла для прямоугольного волновода .....              | 221        |
| 6.3. Поперечно-электрические поля .....                                          | 226        |

|                                                                 |            |
|-----------------------------------------------------------------|------------|
| 6.4. Поперечно-магнитные поля . . . . .                         | 233        |
| 6.5. Волна основного типа в прямоугольном волноводе . . . . .   | 235        |
| 6.6. Поверхностные токи в волноводе . . . . .                   | 237        |
| 6.7. Мощность поля в волноводе . . . . .                        | 240        |
| 6.8. Круглый волновод . . . . .                                 | 243        |
| 6.9. Поперечно-электрические поля в круглом волноводе . . . . . | 247        |
| 6.10. Поперечно-магнитные поля в круглом волноводе . . . . .    | 254        |
| <b>7. Резонаторы диапазона СВЧ . . . . .</b>                    | <b>257</b> |
| 7.1. Общие сведения . . . . .                                   | 257        |
| 7.2. Прямоугольный резонатор . . . . .                          | 258        |
| 7.3. Цилиндрический резонатор . . . . .                         | 264        |
| 7.4. Коаксиальный резонатор . . . . .                           | 267        |
| <b>8. Элементы трактов СВЧ . . . . .</b>                        | <b>270</b> |
| 8.1. Матрицы рассеяния ( $S$ -матрицы) . . . . .                | 270        |
| 8.2. Волноводные разветвления . . . . .                         | 273        |
| 8.3. Изгибы и повороты волноводного тракта . . . . .            | 281        |
| 8.4. Соединения элементов тракта . . . . .                      | 282        |
| 8.5. Согласование волноводов . . . . .                          | 286        |
| 8.6. Согласованные нагрузки и ослабители . . . . .              | 291        |
| 8.7. Ферритовые вентили . . . . .                               | 297        |
| <b>Приложение (справочное) . . . . .</b>                        | <b>299</b> |
| Некоторые сведения из векторного анализа [3,4] . . . . .        | 299        |
| <b>Список литературы . . . . .</b>                              | <b>302</b> |