

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по образованию  
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

**В.А. Тимофеев**

# **Электромагнитные поля и волны**

*Учебное пособие*

*Рекомендовано  
Научно-методическим советом университета  
для студентов, обучающихся по направлению Телекоммуникации  
и специальности Радиотехника*

Ярославль 2008

УДК 537.86/.87:530.182  
ББК 3840я73+В336я73  
Т 41

*Рекомендовано  
Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного издания. План 2008 года*

**Рецензенты:**

кафедра физики Ярославского государственного  
технического университета; ведущий научный сотрудник  
Ярославского филиала физико-технологического института РАН,  
доктор физико-математических наук А.В. Проказников

**Тимофеев, В.А. Электромагнитные поля и волны : учеб.**  
Т 41 пособие / В.А. Тимофеев; Яросл. гос. ун-т. – Ярославль : ЯрГУ,  
2008. –180 с.  
ISBN 978-5-8397-0618-7

В учебном пособии с позиций классической электродинамики излагаются физические закономерности электромагнитных полей и волн. Рассмотрено поведение электромагнитных волн в однородных и неоднородных, изотропных и анизотропных средах. Приведены основные закономерности взаимодействия электромагнитных волн с плоской границей раздела сред, а также подходы к решению задач дифракции. Большое внимание уделено анализу поведения поля в направляющих системах, резонаторах и вопросу излучения электромагнитных волн.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 210400 Телекоммуникации и специальности 210302 Радиотехника (дисциплины "Электромагнитные поля и волны", "Электродинамика и распространение радиоволн", блок ЕН, ОПД), очной формы обучения.

Библиогр.: 11 назв.

УДК 537.86/.87:530.182  
ББК 3840я73+В336я73

ISBN 978-5-8397-0618-7

© Ярославский  
государственный  
университет, 2008

В окружающем нас мире множество явлений и объектов с точки зрения физики может быть описано на основе двух категорий: вещество и поле. В основе принципа, по которому проводится подобное деление, лежит тот факт, что вещество в отличие от поля обладает инертной массой в обычном механическом смысле этого понятия. Движение макроскопических объектов, состоящих из вещества, описывается известными законами механики.

Изучением свойств электромагнитного поля, проявляющего себя посредством сил, действующих на частицы вещества, обладающие электрическим зарядом, занимается электродинамика.

Классическая (макроскопическая) электродинамика приписывает электромагнитному полю только волновые свойства, а элементарным частицам – только корпускулярные. Поля могут накладываться друг на друга и существовать в одном и том же пространстве, а частицы вещества не обладают этим свойством. Электромагнитные поля и частицы взаимно проницаемы и существуют в одном и том же объеме, взаимодействуя друг с другом.

Квантовая электродинамика изучает законы микромира. При этом свойствами материи являются единство волновой и корпускулярной природы всех микрообъектов и взаимопревращаемость различных видов материи. Электромагнитное поле трактуется состоящим из обладающих корпускулярно-волновой природой дискретных фотонов. Фотоны не имеют массы покоя, распространяются со скоростью света в вакууме и целиком поглощаются или излучаются атомами.

Классическая, или максвелловская, теория электромагнитного поля учитывает только макроскопические свойства вещества: предполагается, что размеры рассматриваемой области пространства и расстояние от источников поля до рассматриваемой точки велики по сравнению с размерами молекул, а характерное для изменения электромагнитного поля время (например, период колебаний) велико по сравнению со временем, характерным для внутримолекулярных колебательных процессов. На основе классической теории электромагнитного поля может быть изучен ши-

рокий круг вопросов, встречающихся в радиотехнике. Классическая теория поля не охватывает, однако, всех его свойств. За ее пределами остаются такие явления, как излучение и поглощение веществом электромагнитных волн очень высокой частоты (например, световых), фотоэффект и др. Строгий анализ подобных явлений должен учитывать микроструктуру вещества и, следовательно, должен базироваться на квантовой теории поля. В пределах данного курса изучаются свойства электромагнитных полей и волн с позиций классической теории электродинамики.

## **1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

### ***1.1. Векторы электромагнитного поля***

Поскольку электромагнитное поле характеризуется силами, действующими на заряды, находящиеся в области существования поля, а силы, в свою очередь, представляются векторами, имеется возможность описать электромагнитное поле с помощью абстрактных математических моделей – векторных полей.

#### **1.1.1. Векторы электрического поля**

Сила взаимодействия покоящихся точечных зарядов определяется экспериментальным законом Кулона. Это позволяет ввести понятие электрического поля, задаваемого вектором напряженности  $\vec{E}$ . Вектор  $\vec{E}$  равен силе, с которой электрическое поле действует в данный момент времени в точке наблюдения на единичный положительный заряд. Заряд  $q$  должен быть достаточно малым, чтобы можно было пренебречь изменением распределения зарядов, создающих исследуемое поле. Более строго данное соотношение можно представить в виде

$$\vec{E} = \lim_{q \rightarrow 0} \vec{F}/q. \quad (1.1)$$

Запись  $q \rightarrow 0$  означает, что уменьшается не только величина заряда, но и размеры объекта, на котором распределен заряд. Следует, однако, отметить, что размеры этого объекта должны

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ.....</b>	<b>4</b>
1.1. Векторы электромагнитного поля.....	4
1.2. Уравнения Максвелла .....	10
1.3. Классификация сред. Материальные уравнения .....	14
1.4. Классификация электромагнитных явлений. Гармоническое поле.....	16
1.5. Волновой характер электромагнитного поля .....	19
1.6. Сторонние источники. Полная система уравнений Максвелла .....	29
1.7. Баланс мощности электромагнитного поля. Вектор Пойнтинга .....	32
Вопросы для самоконтроля .....	37
<b>2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ ОДНОРОДНЫХ ИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ.....</b>	<b>38</b>
2.1. Плоские электромагнитные волны в однородных изотропных средах.....	38
2.2. Групповая и фазовая скорость электромагнитных волн	45
2.3. Поляризация электромагнитных волн.....	50
Вопросы для самоконтроля .....	55
<b>3. ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА СРЕД.....</b>	<b>56</b>
3.1. Граничные условия для векторов электромагнитного поля .....	56
3.2. Общие закономерности взаимодействия плоской электромагнитной волны с плоской границей раздела...	61

3.3. Особенности взаимодействия волны с границей "диэлектрик – диэлектрик" .....	65
3.4. Особенности взаимодействия волны с границей "диэлектрик – проводник" .....	68
Вопросы для самоконтроля .....	70
<b>4. ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН .....</b>	<b>71</b>
4.1. Рассеяние электромагнитного поля цилиндром .....	71
4.2. Метод Гюйгенса – Кирхгофа .....	74
4.3. Дифракция на плоском отверстии. Дифракция Френеля и Фраунгофера .....	81
Вопросы для самоконтроля .....	89
<b>5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВОЛНЫ В АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ .....</b>	<b>90</b>
5.1. Общие закономерности переменных полей в анизотропных средах .....	90
5.2. Волны в кристаллах. Уравнение Френеля. Обыкновенные и необыкновенные волны .....	93
5.3. Электромагнитные волны в магнитоактивных средах. Тензор диэлектрической проницаемости плазмы .....	100
5.4. Электромагнитные волны в гиромагнитных средах .....	102
5.4. Распространение электромагнитных волн в гиротропных средах .....	106
Вопросы для самоконтроля .....	112
<b>6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ .....</b>	<b>113</b>
6.1. Приближение геометрической оптики .....	113
6.2. Уравнение эйконала для векторов электромагнитного поля .....	119
6.3. Приближение геометрической оптики для плоскостойких сред .....	120

<i>Вопросы для самоконтроля .....</i>	<i>124</i>
<b>7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВОЛНЫ В НАПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ.....</b>	<b>125</b>
7.1. <i>Электродинамические потенциалы .....</i>	<i>125</i>
7.2. <i>Направляемые электромагнитные волны. Типы волн....</i>	<i>130</i>
7.3. <i>Электромагнитное поле в волноводах.....</i>	<i>134</i>
7.3. <i>Прямоугольный волновод .....</i>	<i>138</i>
7.4. <i>Круглый волновод.....</i>	<i>145</i>
<i>Вопросы для самоконтроля .....</i>	<i>149</i>
<b>8. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В ОБЪЕМНЫХ РЕЗОНАТОРАХ.....</b>	<b>150</b>
8.1. <i>Общие характеристики.....</i>	<i>150</i>
8.2. <i>Прямоугольный резонатор .....</i>	<i>152</i>
8.2. <i>Цилиндрический резонатор .....</i>	<i>156</i>
<i>Вопросы для самоконтроля .....</i>	<i>160</i>
<b>9. ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН .....</b>	<b>161</b>
9.1. <i>Элементарный электрический вибратор.....</i>	<i>161</i>
9.2. <i>Элементарный магнитный вибратор .....</i>	<i>169</i>
9.3. <i>Элемент Гюйгенса.....</i>	<i>171</i>
<i>Вопросы для самоконтроля .....</i>	<i>174</i>
<b>РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>175</b>