

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

---

**Кафедра технической эксплуатации радиоэлектронного  
оборудования воздушного транспорта**

**Д.Н. Яманов, В.Н. Дивеев**

# **ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

**ПОСОБИЕ**

**по изучению дисциплины**

*для студентов III курса  
специальности 25.05.03 (162107)  
заочной формы обучения*

**Москва-2015**

ББК 537

Я 54

Рецензент д-р техн. наук, проф. А.И. Логвин

Яманов Д.Н., Дивеев В.Н.

Я 54 Электродинамика и распространение радиоволн: пособие по изучению дисциплины. - М.: МГТУ ГА, 2015. - 20 с.

Данное пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Электродинамика и распространение радиоволн» по учебному плану для студентов III курса специальности 25.05.03 (162107) заочной формы обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 24.03.15 г. и методического совета 26.03.15 г.

---

Подписано в печать 27.04.2015 г.

Печать офсетная  
1,16 усл.печ.л.

Формат 60x84/16  
Заказ № 2003/

0,92 уч.-изд. л.  
Тираж 70 экз.

---

Московский государственный технический университет ГА  
*125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20*  
Редакционно-издательский отдел  
*125493 Москва, ул. Пулковская, д.6а*

© Московский государственный  
технический университет ГА, 2015

## 1. УЧЕБНЫЙ ПЛАН ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина “Электродинамика и распространение радиоволн (РРВ)” изучается студентами заочной формы обучения на третьем курсе. По данной дисциплине читаются обзорные лекции (12 часов), проводятся лабораторные занятия (12 часов) и консультации. Студенты выполняют одну контрольную работу и сдают дифференцированный зачет по дисциплине. Общее время, затрачиваемое на самостоятельную работу по дисциплине, - 120 часов.

## 2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ДИСЦИПЛИНЕ

### 2.1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины “Электродинамика и распространение радиоволн” является обучение студентов основным принципам теории электромагнитного поля, методам решения задач электродинамики, связанных с излучающими и направляющими системами, а также теории и практики распространения радиоволн. Основными задачами дисциплины являются: формирование необходимого минимума физических, математических, теоретических и практических знаний и навыков, которые обеспечили бы возможность понимать и анализировать электромагнитные процессы, независимо от формы и области их проявления; знаний об основных особенностях распространения радиоволн в различных диапазонах.

В результате изучения дисциплины у студентов должен быть сформирован базис знаний и навыков, позволяющий им успешно осваивать в дальнейшем специальные дисциплины радиотехнического профиля.

### 2.2. Задачи изучения дисциплины (необходимый комплекс знаний и умений)

В результате изучения дисциплины студенты должны:

**иметь представление об** основных закономерностях, которым подчиняются электромагнитные процессы, независимо от формы и области их проявления;

**знать:**

- основные законы теории электромагнитного поля;
- особенности статических и стационарных полей;
- параметры плоской однородной волны, при ее распространении в различных средах;
- структуру электромагнитного поля над идеально проводящей поверхностью;
- поля и параметры направляющих систем и резонаторов;
- основные особенности распространения волн различных диапазонов;

-правила техники безопасности и защиты окружающей среды при работе с СВЧ - устройствами;

**уметь:**

-рассчитывать напряженности электрических и магнитных полей;

-графически изображать поля;

-решать инженерные задачи, связанные с использованием волн в конкретных системах ГА;

**владеть:**

-основными приёмами обработки экспериментальных данных;

-приемами оценивания параметров и характеристик процессов и радиотехнических изделий на основе методов физического исследования;

-методами моделирования или исследования радиоэлектронных узлов и систем для решения прикладных задач.

### 3. ЛИТЕРАТУРА

#### *Основная*

1. Яманов Д.Н. Электродинамика и распространение радиоволн. Ч. 1. Основы электродинамики: Тексты лекций. – М.: МГТУ ГА, 2009.

2. Яманов Д.Н. Основы электродинамики и распространение радиоволн: Тексты лекций. Ч. 2. – М.: МГТУ ГА, 2011.

3. Яманов Д.Н. Основы электродинамики и распространение радиоволн: Тексты лекций. Ч. 3. Распространение радиоволн. - М.: МГТУ ГА, 2006.

#### *Учебно-методическая*

4. Яманов Д.Н. Основы электродинамики и распространение радиоволн: Пособие по выполнению контрольной работы. - М.: МГТУ ГА, 2012.

5. Яманов Д.Н. Электродинамика и распространение радиоволн: Пособие к выполнению лабораторных работ. Часть 1.- М: МГТУ ГА, 2010.

#### *Дополнительная*

6. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. - М.: Высшая школа, 1990.

7. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. - М.: Высшая школа, 1992.

### 4. ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА ИНФОРМАЦИИ

#### *Электронные источники информации по дисциплине*

CD диск «Электродинамика и РРВ (ЗФ)» включает методические материалы по дисциплине.

#### *Ресурсы Интернета*

Список сайтов, содержащих информацию по дисциплине:

<http://www.infanata.com/> ; <http://rbook.ucoz.ru/> ; <http://www.all-librau.com/> ;  
<http://www.radioscanner.ru/>; <http://www.twirpx.com.antenny/>; <http://radioforall.ru/>.

## **5. ЭЛЕКТРОННЫЕ АДРЕСА ДЛЯ КОНСУЛЬТАЦИЙ**

Ответственный за дисциплину проф. Яманов Дмитрий Николаевич  
d.yamanov@mstuca.aero.

## **6. СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Раздел 1. Введение. Исходные понятия и используемый математический аппарат**

Содержание раздела: макроскопическая теория электромагнитного поля; единицы измерения электромагнитных величин в СИ; поля и операции векторного анализа.

### **Раздел 2. Основные законы теории электромагнитного поля**

Содержание раздела: характеристики электромагнитного поля; система уравнений электродинамики; граничные условия электродинамики; основные теоремы электродинамики.

### **Раздел 3. Статистические и стационарные поля**

Содержание раздела: электростатика; стационарное магнитное поле.

### **Раздел 4. Плоские электромагнитные волны**

Содержание раздела: плоская однородная волна и ее параметры; распространение плоских электромагнитных волн в различных средах; виды поляризации электромагнитных волн; отражение и преломление плоских электромагнитных волн.

### **Раздел 5. Электромагнитные волны в гиротропных средах**

Содержание раздела: анизотропные среды; гиротропия; продольное и поперечное распространение электромагнитных волн в гиротропной среде; ферритовые устройства СВЧ.

### **Раздел 6. Электромагнитное поле над идеально проводящей поверхностью**

Содержание раздела: структура поля над идеально проводящей поверхностью; двухплоскостной волновод.

### **Раздел 7. Линии передачи**

Содержание раздела: общие сведения о линиях передачи; поля различных типов волн в волноводах; режимы в волноводах; затухание волн в волноводах; отражения в линиях передачи и необходимость их согласования; выбор размеров волновода по заданному диапазону рабочих частот и типу волны; предельная и допустимая мощности в волноводе; максимально допустимая

длина волноводной линии передачи; методы возбуждения поля в волноводе; линии передачи с волной Т.

### **Раздел 8. Объемные резонаторы**

Содержание раздела: назначение резонаторов; различные виды резонаторов; поля различных типов колебаний в резонаторах.

### **Раздел 9. Электродинамические свойства земной поверхности и атмосферы Земли**

Содержание раздела: электродинамические параметры земной поверхности; атмосфера Земли и ее строение.

### **Раздел 10. Влияние тропосферы и ионосферы на распространение радиоволн**

Содержание раздела: влияние тропосферы и ионосферы на распространение радиоволн; формула идеальной радиопередачи; множитель ослабления.

### **Раздел 11. Особенности распространения радиоволн различных диапазонов**

Содержание раздела: распространение сверхдлинных (мираметровых), длинных (километровых) и средних (гектометровых) волн; распространение коротких (декаметровых) и ультракоротких (метровых, дециметровых, сантиметровых, миллиметровых) волн.

## **7. ТЕРМИНОЛОГИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

**В классической (макроскопической) теории электромагнитного поля** рассматриваются процессы и поля в объемах, размеры которых несоизмеримо больше размеров атомов и молекул. В этом случае рассматриваются поля не каждой частицы в отдельности, а средние значения полей и параметров среды.

**Электромагнитное поле** можно рассматривать как особую форму материи, представляющую собой взаимосвязанные электрическое и магнитное поля.

**Электрическим током** называются любые движущиеся заряды.

**Электрическое поле** представляет собой особый вид материи, отличный от вещества и проявляющийся в виде механической силы, с которой поле действует на внесённый в него неподвижный электрический заряд.

**Магнитное поле** – представляет собой особый вид материи, отличный от вещества и проявляющийся в виде механической силы, с которой поле действует на внесённый в него электрический ток или постоянный магнит.

**Система уравнений электродинамики (уравнений Максвелла)** описывает наиболее общие законы электромагнитного поля. Эти законы связывают между собой электрические и магнитные поля, а также поля с зарядами и токами.

Система уравнений электродинамики полностью исчерпывает свойства электромагнитного поля в пределах классической макроскопической теории.

На границе раздела уравнения электродинамики приобретают особую форму, называемую **граничными условиями**.

**Теорема Умова-Пойнтинга** описывает закон сохранения энергии для электромагнитного поля.

**Волновые уравнения и электродинамические потенциалы** – вспомогательные уравнения и понятия, облегчающие решения задач по определению полей.

**Электростатическим полем** называется электрическое поле неподвижных неизменных зарядов, не изменяющихся во времени.

**Стационарным магнитным полем** называется магнитное поле постоянного тока. Это поле соответствует режиму установившегося движения зарядов.

**Плоская электромагнитная волна** – волна, обладающая плоским фронтом волны.

**Фронт волны** представляет собой геометрическое место точек с одинаковой фазой.

**Поляризация волн** - ориентационная характеристика, определяющая закон изменения и величины вектора -  $\vec{E}$  (или  $\vec{H}$ ) этой волны в данной точке пространства за период колебания.

**Линией передачи (фидером)** называется устройство, направляющее поток электромагнитной энергии в заданном направлении.

**Коэффициент фазы** показывает набег фазы бегущей волны на единицу длины.

**Коэффициент стоячей волны (КСВ)** равен отношению усредненных во времени максимального и минимального значений поля, измеренных в соответствующих сечениях линии.

**Коэффициент полезного действия** – отношение активной мощности в нагрузке к полной активной мощности на входе линии.

**Волны типа Т** характеризуются отсутствием продольных составляющих как электрического, так и магнитного векторов.

**Объемным резонатором** называется часть пространства, ограниченная замкнутой металлической оболочкой, в которую с помощью элементов связи вводится (выводится) электромагнитная энергия.

**Резонансные частоты** – это частоты вынужденных колебаний, на которых взаимный обмен энергией между источником вынужденных колебаний и резонатором отсутствует. Энергия поступает от источника в резонатор только на компенсацию потерь. Поле при резонансе достигает максимального значения, также как и запасенная энергия поля.

**Добротность** – безразмерный параметр, равный отношению электромагнитной энергии, запасенной колебательной системой при резонансе, к энергии потерь за период колебания.

**Тропосферой** называется приземной слой атмосферы, простирающейся до высоты (7- 18) км. В тропосфере содержится до 4/5 массы газов, составляющих атмосферу, и почти все количество водяных паров.

**Ионосферой** называется область атмосферы на высоте 60 - 10000 км над земной поверхностью, где газ частично или полностью ионизирован, т.е. содержит большое число свободных электронов.

**Земными радиоволнами** называют радиоволны, распространяющиеся в непосредственной близости от поверхности Земли.

**Ионосферными волнами** называют радиоволны, распространяющиеся путем отражения от ионосферы или рассеяния в ней.

**Рефракцией** называется искривление траектории радиоволн при распространении ее в неоднородной среде.

**Электронной плотностью** называется число электронов, содержащихся в единице объема воздуха.

**Рекомбинацией** называется процесс воссоединения заряженных частиц и образования нейтральных молекул, т.е. обратный процессу ионизации.

## **8. УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ РАЗДЕЛОВ И ТЕМ ПРОГРАММЫ**

### **Раздел 1. Введение. Исходные понятия и используемый математический аппарат**

Понятие классической – макроскопической теории электромагнитного поля. Векторные функции, характеризующие электромагнитное поле. Единицы измерения электромагнитных величин в СИ. Векторы и действия над ними. Поля и операции векторного анализа.

#### *Методические указания к изучению раздела 1*

Литература: [1, с. 3-15].

Центральные вопросы раздела: макроскопический подход в теории электромагнитного поля; поля и операции векторного анализа.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Сформулируйте правило векторного произведения.
2. Что называется циркуляцией векторного поля?
3. Каковы правила графического построения скалярного поля?
4. Что называется градиентом скалярной функции?
5. Что понимают под силовой линией векторного поля?
6. Что понимается под потоком векторной величины?
7. Что понимается под дивергенцией вектора и что она оценивает в векторном поле?



8. Что понимается под ротором вектора?
9. Приведите примеры полей, у которых  $\operatorname{div} \vec{a}$  и  $\operatorname{rot} \vec{a}$  конечны, равны нулю.
10. Сформулируйте теоремы Стокса и Остроградского-Гаусса.
11. В чем заключается суть макроскопического подхода в теории электромагнитного поля?
12. Поясните физический смысл тождества  $\operatorname{div} \operatorname{rot} \vec{a} = 0$ .

## **Раздел 2. Основные законы теории электромагнитного поля**

Тема 2.1. Характеристики электромагнитного поля.

Электрические заряды. Электрические токи. Собственные векторы электромагнитного поля и электромагнитные параметры среды.

Тема 2.2. Система уравнений электродинамики.

Система уравнений электродинамики в общем виде. Система уравнений электродинамики в комплексной форме. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Угол диэлектрических потерь. Классификация сред на диэлектрики и проводники.

Тема 2.3. Граничные условия электродинамики.

Граничные условия электродинамики в общем виде. Частные случаи граничных условий электродинамики.

Тема 2.4. Основные теоремы электродинамики.

Закон сохранения энергии для электромагнитного поля. Теорема Умова-Пойнтинга. Вектор Пойнтинга. Теорема единственности решения основных уравнений электродинамики. Принцип двойственности. Теорема взаимности. Электродинамические потенциалы и волновые уравнения.

### *Методические указания к изучению раздела 2*

Литература: [1, с. 16-63].

Центральные вопросы раздела: собственные векторы электромагнитного поля и электромагнитные параметры среды; система уравнений электродинамики в общем виде и в комплексной форме; граничные условия электродинамики в общем виде и на поверхности идеального проводника; закон сохранения энергии для электромагнитного поля - теорема Умова-Пойнтинга; вектор Пойнтинга; волновые уравнения.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Какие виды распределения зарядов и токов Вы знаете?
2. Назовите основные векторы электромагнитного поля. Запишите формулы для их определения.
3. Запишите уравнения, связывающие векторы электромагнитного поля с параметрами среды.

4. Каким образом различают виды сред в зависимости от свойств параметров среды?
5. В чем различие между системами уравнений электродинамики, записанными в общем виде и в комплексной форме?
6. Запишите полную систему уравнений электродинамики в интегральной и дифференциальной формах. Поясните физический смысл уравнений.
7. В чем заключается физический смысл тока смещения?
8. Какая среда называется диэлектриком, а какая проводником?
9. Перечислите граничные условия на границе раздела двух сред. Какой вид принимают граничные условия, если вторая среда является идеальным проводником?
10. Прокомментируйте теорему Умова-Пойнтинга, записанную в дифференциальной и интегральной формах.
11. Дайте определение вектора Пойнтинга. Укажите его размерность.
12. Сформулируйте теорему единственности решения основных уравнений электродинамики.
13. Запишите волновые уравнения и выражения для электродинамических потенциалов.
14. Какова последовательность определения поля с использованием электродинамических потенциалов?

### **Раздел 3. Статистические и стационарные поля**

#### Тема 3.1. Электростатика.

Система уравнений электростатики. Скалярный электростатический потенциал и его определение. Граничные условия электростатики. Емкость. Энергия электростатического поля. Прямая и обратная задачи электростатики.

#### Тема 3.2. Стационарное магнитное поле.

Система уравнений стационарного магнитного поля. Прямая задача стационарного магнитного поля. Векторный потенциал магнитного поля. Граничные условия для стационарного магнитного поля. Магнитостатика. Индуктивность. Энергия стационарного магнитного поля.

#### *Методические указания к изучению раздела 3*

Литература: [1, с. 64-75].

Центральные вопросы раздела: система уравнений электростатики; скалярный электростатический потенциал; емкость; система уравнений стационарного магнитного поля; векторный потенциал магнитного поля; индуктивность.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Запишите систему уравнений электростатики. Поясните физический смысл уравнений, входящих в систему.
2. Показать, что скалярный электростатический потенциал является частным случаем скалярного электродинамического потенциала.
3. Какой вид имеют решения уравнений Пуассона для потенциала  $\varphi$ ?
4. Перечислите граничные условия электростатики на границе раздела двух сред.
5. От чего зависит емкость проводников?
6. Сформулируйте прямую и обратную задачи электростатики.
7. Дайте определения электростатического и стационарного магнитного полей.
8. Запишите систему уравнений стационарного магнитного поля. Поясните физический смысл уравнений, входящих в эту систему.
9. Сформулируйте прямую задачу стационарного магнитного поля.
10. Запишите граничные условия для стационарного магнитного поля.
11. Запишите уравнения магнитостатики. Поясните их физический смысл.
12. Как определяется индуктивность контура?

### **Раздел 4. Плоские электромагнитные волны**

Тема 4.1. Плоская однородная волна и ее параметры.

Плоская однородная волна; фронт волны, длина волны, фазовая и групповая скорости, коэффициент фазы, волновое сопротивление.

Тема 4.2. Распространение плоских электромагнитных волн в различных средах.

Распространение плоских электромагнитных волн в однородном изотропном идеальном диэлектрике. Распространение плоских электромагнитных волн в однородных проводящих (поглощающих) средах. Поверхностный эффект.

Тема 4.3. Виды поляризации электромагнитных волн.

Плоскость поляризации. Эллиптическая, круговая и линейная поляризации волн.

Тема 4.4. Отражение и преломление плоских электромагнитных волн.

Законы отражения и преломления. Коэффициенты отражения и преломления. Коэффициенты Френеля для вертикально и горизонтально поляризованных волн. Угол Брюстера. Критический угол. Явление полного внутреннего отражения.

#### *Методические указания к изучению раздела 4*

Литература: [2, с. 3-21].

Центральные вопросы раздела: параметры плоской волны; распространение плоских электромагнитных волн в различных средах; поляризация волн; законы отражения и преломления; углы Брюстера и критический.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Какая волна называется плоской однородной?
2. Дайте определение фронта волны, длины волны, коэффициента фазы, фазовой и групповой скоростей, волнового сопротивления среды.
3. Какое поле называется монохроматическим?
4. Какие уравнения описывают плоскую волну? Записать их решения.
5. Указать особенности распространения плоских электромагнитных волн в однородном изотропном идеальном диэлектрике и в проводящей изотропной среде. Какими особенностями обладает поле в этих средах?
6. Дайте определение поверхностному эффекту. От каких факторов зависит глубина проникновения и сопротивления проводника поверхностному току?
7. Что понимается под поляризацией электромагнитной волны? Какие существуют виды поляризаций электромагнитной волны?
8. При каких условиях эллиптическая поляризация может перейти в линейную, круговую правого и левого вращения?
9. Какую плоскость называют плоскостью падения?
10. Сформулируйте и запишите законы отражения и преломления в изотропной среде.
11. Какими коэффициентами определяется интенсивность отраженной и преломленной волн?
12. Какой угол называется углом Брюстера? При каком условии он может существовать?
13. Какой угол называется критическим? При каком условии наблюдается явление полного внутреннего отражения?
14. Обосновать необходимость учета формы силовых линий поверхностной плотности тока для расчета тепловых потерь в проводнике.

## **Раздел 5. Электромагнитные волны в гиротропных средах**

Тема 5.1. Анизотропные среды. Гиротропия.

Параметры феррита. Анизотропные свойства ферритов в постоянном магнитном поле. Физические процессы в ферритах при распространении электромагнитной волны. Гиротропные среды.

Тема 5.2. Продольное и поперечное распространение электромагнитных волн в гиротропной среде. Ферритовые устройства СВЧ.

Эффект Фарадея. Ферромагнитный резонанс. Эффект Коттон-Мутона. Вентили, циркуляторы и фазовращатели на ферритах.

### *Методические указания к изучению раздела 5*

Литература: [6, с. 42-51, с. 303-314].

Центральные вопросы раздела: физические процессы в ферритах при распространении электромагнитной волны; эффект Фарадея; ферромагнитный резонанс; вентили, циркуляторы на ферритах.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Почему в феррите могут распространяться электромагнитные волны?
2. Что происходит при температуре Кюри и выше нее?
3. Какие свойства проявляет феррит в отсутствии и при наличии постоянного подмагничивающего поля?
4. В чем заключается эффект Фарадея?
5. Как проявляется явление ферромагнитного резонанса?
6. Принципы работы вентиля, циркуляторов и фазовращателей?

### **Раздел 6. Электромагнитное поле над идеально проводящей поверхностью**

Тема 6.1. Структура поля над проводящей плоскостью.

Структура поля над проводящей плоскостью для волн магнитного и электрического типа. Масштаб картин поля.

Тема 6.2. Двухплоскостной волновод.

Картинки полей для волн типа Н и Е. Условие единственности и одноволновой режим. Параметры плоской волны в двухплоскостном волноводе. Условие распространения волн в двухплоскостном волноводе. Критическая длина волны.

### *Методические указания к изучению раздела 6*

Литература: [2, с. 21-28].

Центральные вопросы раздела: структура поля над проводящей плоскостью и в двухплоскостном волноводе; условие распространения волн в двухплоскостном волноводе; критическая длина волны.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Показать, что при падении плоской волны на металлическую поверхность она будет распространяться вдоль границы раздела.
2. Какую волну называют волной магнитного типа и какую - электрического типа?
3. Нарисуйте картинки полей волн типов  $H_1$  и  $E_1$ .
4. Показать, что длина волны в двухплоскостном волноводе больше, чем в неограниченном пространстве при той же частоте.

5. Какая длина волны называется критической?
6. Получить условие единственности волн с  $n=1$ .
7. Почему при  $\lambda > \lambda_{кр}$  волна в двухплоскостном волноводе не распространяется?

## Раздел 7. Линии передачи

Тема 7.1. Общие сведения о линиях передачи.

Открытые и закрытые линии передачи. Основные требования к линиям передачи.

Тема 7.2. Поля различных типов волн в волноводах. Режимы в волноводах.

Волны магнитного и электрического типа. Выражения для составляющих векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  волн типов  $E_{mn}$  и  $H_{mn}$  в прямоугольном и круглом волноводах. Упрощенная методика построения картин поля в волноводе. Картины поля основных типов волн в прямоугольном и круглом волноводах. Распределение на стенках прямоугольного и круглого волноводов поверхностных токов проводимости и силовых линий магнитного поля.

Дисперсия в волноводах. Критическая длина волны, основные типы волн в волноводах. Параметры волн в волноводе (длина волны в волноводе, фазовая и групповая скорости). Докритический режим. Критический режим. Закритический режим. Отличие закритического режима от критического. Структура полей волн основных типов в прямоугольном и круглом волноводах в трех режимах.

Тема 7.3. Затухание волн в волноводах. Отражения в линиях передачи и необходимость их согласования.

Коэффициент затухания в волноводах. Зависимость коэффициента затухания поля в волноводе от частоты. Особенности эксплуатации волноводов. Величины, характеризующие степень согласования линии передачи – коэффициент отражения, коэффициент стоячей волны, коэффициент бегущей волны. Характеристика режимов бегущей, стоячей и смешанной волны в волноводе.

Тема 7.4. Выбор размеров волновода по заданному диапазону рабочих частот и типу волны. Предельная и допустимая мощности в волноводе.

Многоволновой и одноволновой режимы волновода. Выбор размеров волновода для работы в одноволновом режиме. Предельная, допустимая, рабочая и пробивная мощности. Повышение электрической прочности волноводов. Коэффициент полезного действия линии передачи и возможности его увеличения.

Тема 7.5. Максимально допустимая длина волноводной линии передачи. Методы возбуждения поля в волноводах.

Физические факторы ограничения длины волноводной линии передачи. Общие принципы размещения возбуждающих устройств. Примеры возбуждения штырем, петель и щелью полей различного типа в волноводах.

### Тема 7.6. Линии передачи с волной типа Т.

Уравнение Лапласа. Параметры волны в линии передачи с волной типа Т (характеристическое сопротивление, фазовая скорость). Энергетические параметры линии передачи с волной типа Т (мощность, переносимая волной по линии передачи, коэффициент ослабления). Достоинства и недостатки линий передачи с волной типа Т. Двухпроводные, коаксиальные и полосковые линии передачи.

#### *Методические указания к изучению раздела 7*

Литература: [2, с. 29-64].

Центральные вопросы раздела: основные требования к линиям передачи; волны магнитного и электрического типа; картины поля основных типов волн в прямоугольном и круглом волноводах в трех режимах; дисперсия в волноводах и критическая длина волны; параметры волны в волноводе; режимы в волноводе (докритический, критический, закритический); коэффициент затухания в волноводах; согласование линии передачи; режимы бегущей, стоячей и смешанной волны в волноводе; одноволновый режим работы волновода; выбор размеров волновода в одноволновом режиме; повышение электрической прочности волнопроводов; коэффициент полезного действия линии передачи; общие принципы размещения возбуждающих устройств; двухпроводные, коаксиальные и полосковые линии передачи.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Какие линии передачи относятся к открытым, а какие к закрытым?
2. Перечислите основные требования к линиям передачи.
3. На какие два типа разделяются все волны, распространяющиеся в волноводах? Дайте их определения.
4. Что показывают индексы в названии типа волны?
5. Нарисуйте картины полей основных типов волн в прямоугольном и круглом волноводах.
6. Какие существуют режимы работы волновода? Сформулируйте условия, при которых они возникают.
7. Какие причины приводят к существованию в волноводе критической частоты? Что понимается под критической частотой?
8. Какой тип волны в волноводе называется основным и в чем преимущество работы с основной волной?
9. Нарисовать структуру поля волны  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе в трех режимах. Дать характеристику каждого из этих режимов.
10. Как определяется коэффициент затухания в Неп/м, дБ/м? Нарисуйте график частотной зависимости затухания для волн различных типов.

11. В каком случае линию передачи можно считать согласованной с нагрузкой? Какие величины используются для характеристики степени согласования?

12. Дайте характеристику режимов бегущей волны, стоячей волны и смешанного.

13. Чем руководствуются при выборе размеров поперечного сечения волноводов?

14. Как определяются предельная, допустимая и рабочая мощности в волноводе?

15. Привести зависимость  $P_{\text{пред}}$  от частоты. Пояснить ее.

16. От каких причин зависит КПД линии передачи и что следует сделать, чтобы он был возможно выше?

17. Какие существуют типы устройств, возбуждающих волновод? Сформулируйте общие принципы размещения возбуждающих устройств в волноводе (привести примеры).

18. Поясните особенности строения поля волны типа Т.

19. Какими уравнениями описывается поле в линиях передачи с волной типа Т?

20. Какие параметры характеризуют линии передачи с волной типа Т?

21. Какими достоинствами и недостатками обладают линии передачи с волной типа Т?

22. Какими параметрами характеризуются двухпроводные линии передачи? Перечислите основные достоинства и недостатки этих линий.

23. Нарисуйте картину поля в коаксиальной линии передачи. Поясните особенности этого поля.

24. Какими параметрами характеризуется коаксиальная линия? Достоинства и недостатки этой линии передачи.

25. Приведите картины силовых линий электромагнитного поля в полосковых линиях. Укажите особенности этого поля. Какими достоинствами и недостатками обладают эти линии?

## **Раздел 8. Объемные резонаторы**

Тема 8.1. Назначение резонаторов. Различные виды резонаторов.

Назначение резонаторов. Виды резонаторов. Свойства резонаторов.

Тема 8.2. Поля различных типов колебаний в резонаторах.

Правила графического изображения поля резонатора. Собственные и резонансные частоты резонаторов. Запасенная в резонаторе электромагнитная энергия. Добротность резонаторов.

*Методические указания к изучению раздела 8*

Литература: [2, с. 64-76].



Центральные вопросы раздела: назначение и виды резонаторов; свойства резонаторов; правила графического изображения поля резонатора; добротность резонаторов.

*Вопросы для самопроверки*

1. Почему в диапазоне СВЧ нельзя использовать колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора?
2. Рассмотрите основные конструкции объемных резонаторов. Назовите общие свойства резонаторов.
3. В чем заключается особенность тороидального резонатора?
4. Почему добротность объемных резонаторов может достигать достаточно больших значений?
5. В чем заключаются правила графического изображения поля в резонаторе?
6. Дайте определение собственной и резонансной частот резонатора.
7. Что показывают индексы в обозначении типа колебания резонатора?
8. Что называют добротностью резонансной системы? Что определяет добротность в резонаторе? Как она определяется?

**Раздел 9. Электродинамические свойства земной поверхности и атмосферы Земли**

Тема 9.1. Электродинамические параметры земной поверхности. Атмосфера Земли и ее строение.

*Методические указания к изучению раздела 9*

Литература: [3, с. 4-7, 13-29].

Центральные вопросы раздела: электродинамические свойства земной поверхности и атмосферы Земли.

*Вопросы для самопроверки*

1. Перечислите основные параметры подстилающей поверхности.
2. Как определить комплексную диэлектрическую проницаемость?
3. Какая среда называется диэлектриком, а какая проводником? В каком диапазоне земную поверхность можно считать проводником, а в каком диэлектриком?
4. Как и почему меняются диэлектрические свойства сред при увеличении частоты?
5. Поясните деление атмосферы на различные области.

**Раздел 10. Влияние тропосферы и ионосферы на распространение радиоволн**

Тема 10.1. Влияние тропосферы и ионосферы на распространение радиоволн. Отражение радиоволн от ионосферных слоев.

Тема 10.2. Формула идеальной радиопередачи. Множитель ослабления.

*Методические указания к изучению раздела 10*

Литература: [3, с. 30-52].

Центральные вопросы раздела: затухание радиоволн в тропосфере; отражение радиоволн от ионосферных слоев; формула идеальной радиопередачи.

*Вопросы для самопроверки*

1. Запишите и поясните формулу идеальной радиопередачи.
2. В чем заключается суть явления, которое получило название атмосферной рефракции?
3. Поясните зависимость затухания радиоволн в тропосфере от частоты.
4. Каковы условия отражения радиоволн от ионосферных слоев?
5. Дайте характеристику слоев D, E и F.
6. Почему распределение электронной концентрации в ионосфере по высоте разное днем и ночью?

**Раздел 11. Особенности распространения радиоволн различных диапазонов**

Тема 11.1. Распространение сверхдлинных (мираметровых), длинных (километровых) и средних (гектометровых) волн.

Тема 11.2. Распространение коротких (декаметровых) и ультракоротких (метровых, дециметровых, сантиметровых, миллиметровых) волн. Экологические проблемы.

*Методические указания к изучению раздела 11*

Литература: [3, с. 53-85].

Центральные вопросы раздела: особенности распространения радиоволн различных диапазонов.

*Вопросы для самопроверки*

1. Каковы преимущества радиосвязи на длинных и сверхдлинных волнах?
2. Поясните особенности распространения длинных и сверхдлинных волн.
3. Как изменяются условия распространения средних волн в течение суток?

4. Какова природа замираний сигнала на средних волнах?
5. Исходя из какого условия выбирают максимальную применимую частоту (МПЧ)?
6. В какое время суток можно работать на более высоких частотах в пределах коротковолнового диапазона?
7. Какие участки вдоль трассы называют зонами молчания?
8. Как определяется максимальная длина трассы УКВ-радиолинии?
9. Запишите и поясните интерференционную формулу Б.А. Введенского для расчета УКВ-радиолинии.
10. Сравните преимущества и недостатки радиолиний тропосферного рассеяния и метеорного отражения.
11. Как влияет на здоровье человека длительное воздействие на его организм мощных полей?

## **9. СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИЙ**

- Лекция 1. Установочная лекция- 2 курс
- Лекция 2. Обзорная лекция №1. По темам 2.1-3.2.
- Лекция 3. Обзорная лекция №2. По темам 4.1-5.2.
- Лекция 4. Обзорная лекция №3. По темам 6.1-7.6.
- Лекция 5. Обзорная лекция №4. По темам 8.1,8.2.
- Лекция 6. Обзорная лекция №5. По темам 9.1-11.2.

## **10. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ**

Перечень лабораторных занятий [5]:

1. Исследование работы волноводной линии передачи (для данного занятия базовым является раздел 7).
  2. Элементы волноводного тракта (для данного занятия базовым является раздел 7).
  3. Волноводные устройства, применяющие подмагниченные ферриты (для данного занятия базовым является раздел 5).
- На каждое лабораторное занятие отводится 4 часа.

## **11. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА**

Контрольная работа состоит из трех задач:

1. Плоские электромагнитные волны.
2. Волноводные линии передачи.
3. Объемные резонаторы.

Варианты заданий для задач берутся из [4]. Задания выбираются в соответствии с двумя последними цифрами студенческого билета.

При выполнении контрольной работы необходимо использовать пособие [4]. Пособиями, кроме указанного, могут являться [1, 2], [6, 7].

**СОДЕРЖАНИЕ**

1. Учебный план дисциплины .....	3
2. Основные сведения о дисциплине .....	3
3. Литература.....	4
4. Электронные средства информации .....	4
5. Электронные адреса для консультаций.....	5
6. Структура дисциплины .....	5
7. Терминология дисциплины.....	6
8. Учебная программа дисциплины и методические указания к изучению разделов и тем программы.....	8
9. Содержание лекций.....	19
10. Лабораторные занятия .....	19
11. Контрольная работа.....	19