

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

**Д. В. Гололобов, В. Б. Кирильчук**

***ОСНОВЫ РАДИОФИЗИКИ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ  
РАДИОВОЛН И АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА***

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики  
и радиоэлектроники для специальностей*

*1-39 03 01 «Электронные системы безопасности»,*

*1-45 01 01 «Многоканальные системы телекоммуникаций»,*

*1-45 01 02 «Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения»,*

*1-45 01 03 «Сети телекоммуникаций» в качестве пособия*

Минск БГУИР 2013

УДК [537.86+621.371+621.396.67](076)

ББК 32.841я73+32.845я73

Г61

**Р е ц е н з е н т ы:**  
кафедра радиотехники  
учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»  
(протокол №3-2/2012 от 19.03.2012 г.);

заведующий кафедрой информатики и основ электроники  
учреждение образования «Белорусский государственный педагогический  
университет имени Максима Танка»,  
кандидат физико-математических наук, доцент К. А. Саечников

**Гололобов, Д. В.**  
Г61 Основы радиофизики, распространение радиоволн и антенно-  
фидерные устройства: пособие / Д. В. Гололобов, В. Б. Кирильчук. –  
Минск : БГУИР, 2013. – 61 с.  
ISBN 978-985-488-927-6.

Пособие содержит программы, методические рекомендации и контрольные задания по дисциплинам «Электромагнитные поля и волны», «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства», «Основы радиофизики». В каждом разделе представлены контрольные вопросы, способствующие самостоятельной подготовке студентов, предложена методика выполнения индивидуальных контрольных работ.

**УДК [537.86+621.371+621.396.67](076)**  
**ББК 32.841я73+32.845я73**

**ISBN 978-985-488-927-6**

© Гололобов Д. В., Кирильчук В. Б., 2013  
© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники», 2013

## Введение

Актуальность изучения дисциплин «Электромагнитные поля и волны», «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства», «Основы радиофизики» определяется тенденциями развития современной радиоэлектроники, требующими использования знаний в области теории современной электродинамики, антенн и радиосвязи. Это связано с необходимостью освоения все более высокочастотных диапазонов, способствующих увеличению числа информационных каналов и эффективностью их использования, увеличению скорости передачи информации, быстрдействию информационных систем; с созданием альтернативных каналов передачи информации, способствующих повышению уровня достоверности срабатывания и/или доставки сообщений в заданный интервал времени о состоянии контролируемого объекта и др.

Использование частот СВЧ- и КВЧ-диапазонов для реализации необходимых функций предъявляет повышенные требования к радиоэлектронной аппаратуре и быстрейшему внедрению новых конструктивных технических решений. В процессе их внедрения требуется освоение новых подходов, связанных с использованием технологий, основанных на преобразованиях электромагнитных полей, трансформации структуры *электродинамических сигналов как носителей информации*. Основу радиоаппаратуры этих диапазонов составляют элементы с распределенными параметрами, зависящие от линейных геометрических размеров, связанных с длиной волны, что определяет необходимость изучения отдельных законченных компонентов и узлов этих диапазонов.

Целью изучения дисциплины «Электромагнитные поля и волны» является освоение студентами основ теории электромагнитного поля и электродинамики, основных элементов и устройств СВЧ, расчета и измерения параметров этих устройств, их применения при проектировании радиотехнических устройств и систем. Названная дисциплина обеспечивает изучение курса «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства» для специальности 1-45 01 02 «Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения», в пределах которого студенты должны изучить важные элементы теории распространения волн и антенн для грамотного построения современных систем телекоммуникаций.

Дисциплина «Основы радиофизики» служит теоретической базой подготовки инженера по специальности 1-39 03 01 «Электронные системы безопасности» в части проектирования телекоммуникационных (радиочастотных) каналов, обеспечивающей взаимосвязь между составными частями электронных систем безопасности (ЭСБ), центральными пультами управления и операторами. От правильного проектирования этих каналов во многом зависит эффективность функционирования ЭСБ в целом. Знание общих закономерностей генерации, передачи, приема, регистрации и анализа колебаний и волн в различных частотных диапазонах способствует успешному решению проектных задач при разработке ЭСБ.

# **1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВОЛНЫ**

## **1.1. СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ**

### **1.1.1. Основные уравнения электродинамики**

Определение электромагнитного поля (ЭМП). Векторы ЭМП. Четыре уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной формах. Их физическое содержание. Закон сохранения заряда и уравнение непрерывности. Материальные уравнения, классификация сред.

### **1.1.2. Граничные условия для векторов ЭМП**

Граничные условия (ГУ) для тангенциальных составляющих. ГУ для нормальных составляющих векторов ЭМП. ГУ на поверхности идеального проводника.

### **1.1.3. Энергия ЭМП**

Удельная мощность сторонних источников в ЭМП. Баланс энергии в ЭМП. Теорема Умова – Пойнтинга.

### **1.1.4. Монохроматические электромагнитные поля**

Уравнения Максвелла в комплексной форме, комплексная диэлектрическая и магнитная проницаемость. Закон сохранения энергии для монохроматического поля, комплексный вектор Умова – Пойнтинга.

Постановка задач для монохроматического поля, теорема единственности. Уравнения Гельмгольца для векторов поля. Электродинамические потенциалы.

### **1.1.5. Излучение электромагнитных волн**

Решение неоднородного уравнения Гельмгольца. Условие излучения на бесконечности. Элементарный электрический вибратор. Поля элементарного вибратора в ближней и дальней зонах. Сферические волны. Диаграмма направленности. Мощность и сопротивление излучения вибратора. Магнитный ток. Перестановочная инвариантность уравнений Максвелла, принцип двойственности. Поле элементарного магнитного вибратора. Проводимость излучения магнитного вибратора. Лемма Лоренца. Принцип взаимности. Теорема эквивалентности и формула Кирхгофа.

### **1.1.6. Плоская электромагнитная волна**

Плоская волна в непроводящей среде. Фазовая скорость волны, волновое сопротивление среды. Поляризация волн. Плоская волна в среде с потерями. Коэффициент фазы и коэффициент затухания. Глубина проникновения. Дисперсия, групповая скорость.

Плоские волны в гиротропных средах (плазма, ферриты в постоянном магнитном поле). Продольное и поперечное распространение волн. Эффект вращения плоскости поляризации.

Падение волны на плоскую границу раздела сред. Законы Снеллиуса и формула Френеля. Полное отражение. Поверхностные волны. Угол полного преломления. Понятие о двойном преломлении при падении электромагнитных волн на границу с гиротропной средой.

Особенности преломления волны в проводящих средах. Граничные условия Леонтовича. Потери энергии в проводнике, поверхностный эффект.

### **1.1.7. Дифракция и рефракция электромагнитных волн**

Задача дифракции как граничная задача электродинамики. Дифракция плоской волны на круглом цилиндре. Приближенные методы решения задач дифракции в квазистатической и квазиоптической областях.

Физическая оптика. Дифракция на отверстиях в экране в приближении Кирхгофа. Дифракционное поле в дальней зоне. Зоны Френеля. Геометрическая оптика. Рефракция электромагнитных волн в неоднородной среде. Понятие о геометрической теории дифракции.

### **1.1.8. Направляющие системы и направляемые волны**

Классификация и общие свойства направляемых волн. Быстрые и медленные волны.

Волны типа  $E$  ( $TM$ ) и  $H$  ( $TE$ ). Граничная задача для волноводов.

Прямоугольный волновод. Решение граничной задачи. Структура и свойства полей в волноводе.

Типы волн, дисперсия, фазовая и групповая скорости распространения волн в волноводе. Основная волна  $H_{10}$ . Токи и заряды на стенках волноводов.

Круглый волновод. Решение граничной задачи. Простейшие типы волны  $H_{11}$ ,  $E_{10}$ ,  $H_{01}$ .

Коаксиальная линия. Основная волна  $T$  ( $TEM$ ). Понятие о высших типах волн в коаксиальной линии. Полосковые линии.

### **1.1.9. Резонаторы**

Электромагнитные поля в объемных резонаторах. Граничная задача для резонатора. Решение граничной задачи для прямоугольного, цилиндрического и коаксиального резонаторов. Типы колебаний в объемном резонаторе, собственные частоты. Добротность резонаторов. Понятие о возбуждении резонаторов. Понятие о квазиоптических резонаторах.

### **1.1.10. Элементы и узлы линий передачи**

Элементы коаксиальных линий передачи: соединения, элементы крепления внутреннего проводника, изгибы, короткозамыкающие поршни. Элементы волноводных линий: соединения, изгибы, реактивные элементы, разветвления, переходники. Узлы СВЧ-трактов: поглощающие нагрузки, аттенюаторы, взаимные фазовращатели, фильтры типов волн, волноводные вращающиеся сочленения.

### **1.1.11. Согласование линий передачи с нагрузкой**

Цели согласования линии передачи с нагрузкой. Узкополосное согласование. Методы согласования одним реактивным шлейфом, двухшлейфным трансформатором, четвертьволновым трансформатором. Примеры расчета согласующих устройств.

Широкополосное согласование. Ограничения в теории широкополосного согласования. Пример расчета широкополосного согласующего устройства. Принципы широкополосного согласования активных нагрузок. Плавные и ступенчатые переходы.

### **1.1.12. Частотные фильтры СВЧ**

Характеристика и типы фильтров. Синтез фильтра по рабочим параметрам. Расчет числа и величин элементов фильтра-прототипа. Фильтр с четвертьволновыми связями. Связь задачи синтеза фильтров с задачей широкополосного согласования.

Техническая реализация и применение фильтров на СВЧ.

### **1.1.13. Делители мощности и балансные устройства СВЧ**

Волноводные тройники. Двойной волноводный тройник. Основные свойства.

Направленные ответвители. Основные параметры, конструкции волноводного и коаксиального ответвителей.

Балансные мосты. Волноводно-щелевой мост. Конструкция. Кольцевые балансные мосты.

### **1.1.14. Устройства СВЧ с намагниченными ферритами**

Распространение электромагнитных волн в продольно- и поперечно-намагниченных средах. Эффект Фарадея. Продольный и поперечный феррорезонансы. Эффект смещения поля. Явление двойного лучепреломления.

Ферритовые фазовращатели. Фазовращатели на круглом и прямоугольном волноводах.

Вентили. Вентиль на прямоугольном волноводе. Резонансные вентили на прямоугольном волноводе. Вентили на смещении поля.

Циркуляторы. Циркулятор на круглом волноводе. Фазовые циркуляторы. Y-циркулятор. Применение циркуляторов.

## **Литература**

### **Основная**

1. Кураев, А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Сеницын. – Минск : Бестпринт, 2004. – 357 с.

2. Гололобов, Д. В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства: метод. пособие для студ. спец. 1-45 01 02 «Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения» днев. и вечер. форм обуч.: Ч. 1. Распространение

радиоволн / Д. В. Гололобов, В. Б. Кирильчук. – Минск : БГУИР, 2004. – 124 с.

3. Гололобов, Д. В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства: метод. пособие для студ. спец. 1-45 01 02 «Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения» днев. и вечер. форм обучения: Ч. 2. Фидерные устройства / Д. В. Гололобов, В. Б. Кирильчук. – Минск : БГУИР, 2005. – 299 с.

4. Вольман, В. И. Техническая электродинамика / В. И. Вольман, Ю. В. Пименов. – М. : Связь, 1971, 2002. – 352 с.

5. Семенов, Н. А. Техническая электродинамика / Н. А. Семенов – М. : Связь, 1973. – 470 с.

6. Никольский, В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М. : Наука, 1998. – 544 с.

7. Баскаков, И. С. Электродинамика и распространение радиоволн / И. С. Баскаков. – М. : Высш. шк., 1993. – 438 с.

Дополнительная

8. Красюк, П. Л. Электродинамика и распространение радиоволн / П. Л. Красюк, П. Д. Дымович – М. : Высш. шк., 1974. – 304 с.

9. Ширман, Я. Д. Радиоволноводы и объемные резонаторы / Я. Д. Ширман – М. : Связьиздат, 1959. – 342 с.

10. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры / под ред. Б. Ф. Высоцкого. – М. : Сов. радио, 1977. – 322 с.

11. Вайнштейн, Л. А. Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. – М. : Радио и связь, 1988. – 581 с.

## 1.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

### 1.2.1. Основные уравнения электродинамики

Необходимо знать: определения векторов электромагнитного поля  $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$ ,  $\vec{V}$ ,  $\vec{H}$  и связь между ними; классификацию сред по макроскопическим параметрам (линейные и нелинейные, однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные); физический смысл уравнений Максвелла и их запись в интегральной и дифференциальной формах.

Понимать: уравнения Максвелла при наличии сторонних токов и зарядов; суть понятия сторонних сил и форм их задания (сторонние заряды, ток, напряженность поля).

Уметь классифицировать электромагнитные явления по характеру их изменения во времени (переменные, статические, стационарные и квазистационарные поля).

#### *Контрольные вопросы*

1. Векторы электромагнитного поля  $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$ ,  $\vec{V}$ ,  $\vec{H}$ .
2. Первое и второе уравнения Максвелла, их физический смысл.
3. Ток проводимости и ток смещения.
4. Третье и четвертое уравнения Максвелла, их физический смысл.
5. Уравнение непрерывности и закон сохранения заряда.
5. Классификация электромагнитных явлений по характеру их изменения во времени.
6. Уравнения Максвелла с учетом сторонних токов и зарядов.

### 1.2.2. Граничные условия для векторов ЭМП

Необходимо знать: понятие «граница раздела сред»; граничные условия для нормальных и тангенциальных составляющих поля.

#### *Контрольные вопросы*

1. Определение границы раздела сред.
2. Условия для тангенциальных составляющих поля на границе раздела двух сред.
3. Условия для нормальных составляющих поля на границе раздела двух сред.
4. Поверхностный ток и поверхностная плотность заряда.

### 1.2.3. Энергия ЭМП

Необходимо знать: понятие удельной мощности сторонних источников. Иметь четкое представление о всех составляющих баланса энергии в ЭМП. Понимать: физический смысл вектора Умова – Пойнтинга. Знать теорему Умова – Пойнтинга.



### **Контрольные вопросы**

1. Определение вектора Умова – Пойнтинга.
2. Определение удельной мощности.
3. Баланс энергий ЭМП.
4. Формулировка теоремы Умова – Пойнтинга.

#### **1.2.4. Монохроматические электромагнитные поля**

*Важным для практики является изучение переменного электромагнитного поля, изменяющегося по синусоидальному периодическому (гармоническому) закону. Зная законы, описывающие поведение гармонического (или, как часто называют, монохроматического) поля, можно с помощью спектрального анализа найти электромагнитное поле, изменяющееся во времени по более сложному закону.*

Необходимо знать: уравнения Максвелла для монохроматического поля в комплексной форме; смысл введения комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости, тангенса угла потерь; критерий деления сред на проводники и диэлектрики.

### **Контрольные вопросы**

1. Комплексная диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, тангенс угла потерь. Критерий деления сред на проводники и диэлектрики.
2. Система уравнений Максвелла для монохроматического поля в комплексной форме.

#### **1.2.5. Излучение электромагнитных волн**

Необходимо знать: ток, меняющийся во времени – первичный источником электромагнитных волн. Иметь четкое представление о принципе работы элементарных излучателей.

*Как правило, расчет полей излучающих систем ведется методом суперпозиции: вся система разбивается на элементарные излучатели, находится поле от каждого, а затем поля всех излучателей суммируются. Принцип эквивалентности и принцип Гюйгенса – Кирхгофа позволяют проследить за распространением фронта волны, начиная с момента, в который фронт волны является известным.*

### **Контрольные вопросы**

1. Суть процесса излучения электромагнитных волн.
2. Элементарный электрический излучатель, определение и принцип работы.
3. Анализ структуры поля элементарного электрического излучателя.
4. Диаграммы направленности элементарного электрического излучателя (в полярной и прямоугольной системах координат).

5. Мощность излучателя, сопротивление излучения элементарного электрического излучателя.
6. Ближняя и дальняя зоны.
7. Элементарный магнитный излучатель; поле в дальней зоне.
8. Перестановочная двойственность уравнений Максвелла.

### 1.2.6. Плоская электромагнитная волна

Необходимо знать: поведение векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  электромагнитной волны в различных средах; затухание волны в идеальном диэлектрике и в реальной среде распространения; зависимость параметров волны в среде без потерь и с потерями от частоты; определение фазовой скорости, коэффициента фазы и затухания, скорости переноса энергии, волнового сопротивления.

*Среды, свойства которых различны по разным направлениям, называют анизотропными; в таких средах векторы  $\vec{P}$  и  $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$ , а также  $\vec{M}$  и  $\vec{H}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  могут быть непараллельными, где один из параметров является тензором.*

*В ферромагнитных средах тензором является магнитная проницаемость. В постоянном магнитном поле один из видов магнетиков – феррит – становится анизотропной средой по отношению к переменному полю.*

#### Контрольные вопросы

1. Определение однородной плоской волны. Выражение для векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  этой волны.
2. Выражение для фазовой скорости, длины волны, волнового числа, комплексного вектора Пойнтинга и волнового сопротивления в среде с потерями и без потерь.
3. Коэффициент фазы и коэффициент затухания; фазовая скорость и длина волны в среде с малыми и большими потерями.
4. Физическая природа анизотропии. Примеры анизотропных сред.
5. Анизотропные магнетики. Тензор магнитной проницаемости и смысл его составляющих.
6. Зависимость составляющих тензора магнитной проницаемости феррита от напряженности поля подмагничивания. Ферромагнитный резонанс.
7. Фазовые скорости и поляризация волн в продольно-намагниченном феррите.
8. Эффект Фарадея. Вращение плоскости поляризации. Необратимость эффекта Фарадея.
9. Фазовые скорости и поляризация волн в поперечно-намагниченном феррите.

### **1.2.7. Дифракция и рефракция электромагнитных волн**

Необходимо знать: суть явления дифракции электромагнитных волн, ее виды; приближение Гюйгенса – Кирхгофа; метод геометрической оптики, метод краевых волн; суть явления рефракции и ее виды.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Явление дифракции электромагнитных волн. Приближенные решения дифракционных задач.
2. Условия применимости геометрической оптики. Изменение интенсивности поля вдоль луча в приближении геометрической оптики.
3. Условия применимости физической оптики. Приближения физической оптики.
4. Суть явления рефракции. Виды рефракции.

### **1.2.8. Направляющие системы и направляемые волны**

Необходимо знать: системы передачи энергии электромагнитного поля: прямоугольный и круглый волновод, коаксиальные линии, полосковые и микрополосковые линии; методы решения волновых уравнений для продольной составляющей основных волн; определение поперечных составляющих.

Уметь изображать структуры полей в прямоугольном и круглом волноводах.

Иметь четкое представление о параметрах направляющих систем и параметрах направляемых волн (фазовая и групповая скорости, длина волны, коэффициент фазы, критическая частота, характеристическое сопротивление).

#### ***Контрольные вопросы***

1. Типы направляющих систем, требования, предъявляемые к ним.
2. Классификация направляемых волн.
3. Волновые уравнения для направляемых волн.
4. Решение волнового уравнения для продольной составляющей в прямоугольном волноводе.
5. Структура поля и параметры волн  $E$  и  $H$  в прямоугольном волноводе.
6. Решение волнового уравнения для волны  $E$  и  $H$  в круглом волноводе.
7. Структура полей и основные параметры волн типа  $E$  и  $H$  в круглом волноводе.
8. Токи на стенках волнопроводов при распространении различных типов волн.
9. Структура полей и условия их существования в коаксиальной линии.
10. Параметры полосковых и микрополосковых линий. Технология изготовления микрополосковых линий. Применение микрополосковых линий.

### **1.2.9. Резонаторы**

Необходимо знать: принципы построения объемных резонаторов из отрезков регулярных линий передач; методику расчета их основных характери-

стик; принцип построения структуры полей основных типов; способы возбуждения объемных резонаторов.

### **Контрольные вопросы**

1. Типы объемных резонаторов. Основные параметры: резонансная частота, добротность.
2. Четвертьволновый и полуволновой коаксиальные резонаторы.
3. Основное поле прямоугольного резонатора. Собственная частота. Эскиз распределения поля. Добротность.
4. Цилиндрический резонатор. Собственные частоты. Эскизы распределения полей типа  $E_{010}$ ,  $E_{011}$ ,  $H_{011}$ ,  $H_{111}$ .
5. Потери энергии в объемном резонаторе. Собственная, внешняя и нагруженная добротности.
6. Способы возбуждения объемных резонаторов.
7. Квазистационарные резонаторы. Метод расчета резонансных частот. Области применения.

### **1.2.10. Элементы и узлы линий передачи**

Необходимо знать: неоднородности в виде устройств возбуждения и отбора энергии из волновода или другого типа линии передачи, модуляции, детектирования, фильтрации электромагнитного сигнала и т. д.; методы определения их параметров; физические принципы работы устройств, позволяющие проводить расчет их основные параметры по эквивалентным схемам с сосредоточенными элементами.

### **Контрольные вопросы**

1. Конструкции и свойства коаксиальных линий. Их сравнительные характеристики и области применения.
2. Элементы, применяемые для настройки коаксиальных линий.
3. Устройство и принцип работы коаксиального вращающегося сочленения.
4. Способы сочленения волноводов и коаксиальных линий.
5. Способы сочленения прямоугольных и круглых волноводов.
6. Устройство четвертьволновой вставки, реактивных штырей и диафрагм, используемых для настройки волноводов.
7. Устройство  $T$ -образных волноводных ответвителей, дроссельных фланцевых соединений и короткозамыкающих поршней прямоугольного волновода.
8. Поглощающие и предельные аттенюаторы; согласованные нагрузки.
9. Устройство детекторных и термисторных головок.
10. Линия передачи конечной длины. Основы узкополосного согласования.
11. Способы микроминиатюризации элементов фидерного тракта.

### **1.2.11. Согласование линий передачи**

*Основная задача согласования – построение и расчет согласующего четырехполюсника. Элементы узкополосного согласующего четырехполюсника могут быть рассчитаны точно или приближенно по круговой диаграмме.*

*Для практических целей точность, получающаяся при использовании круговой диаграммы, достаточна.*

Необходимо знать: методы расчета согласующего устройства с применением круговой диаграммы; суть узкополосного и широкополосного согласования; отличие постановки задачи широкополосного согласования от соответствующей задачи узкополосного согласования.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Суть согласования линии передачи с нагрузкой.
2. Принцип узкополосного согласования посредством реактивного шлейфа.
3. Методика согласования одним реактивным шлейфом.
4. Принцип согласования двухшлейфовым трансформатором.
5. Свойство четвертьволнового отрезка линии передачи.
6. Задача широкополосного согласования линии передачи с комплексной нагрузкой.
7. Ограничения в теории широкополосного согласования линии передачи с нагрузкой.
8. Отличия требований к согласующему четырехполюснику при узкополосном и широкополосном согласовании.

### **1.2.12. Частотные фильтры СВЧ**

Необходимо знать: классификацию фильтров СВЧ по типу частотной характеристики; формулы для расчета резонансной частоты, коэффициента передачи и нагруженной добротности; виды аппроксимаций частотных характеристик; принцип реализации многосвязных фильтров СВЧ с четвертьволновыми и непосредственными связями.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Методика расчета и построение ступенчатых переходов с максимально плоской и чебышевской частотными характеристиками.
2. Полосовой и режекторный фильтры и их эквивалентные схемы. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики.
3. Фильтры гармоник: резонансные, апериодические, с поглощением энергии гармоник.

### **1.2.13. Делители мощности и балансные устройства СВЧ**

Необходимо знать: устройства и принцип построения трех- и четырехплечих узлов без потерь (волноводные, коаксиальные, микрополосковые), служащих для ответвления энергии СВЧ, регулировки мощности проходящей вол-

ны, сложения и разделения сигналов, измерений и коммутаций в трактах СВЧ. Конкретная форма матрицы рассеяния определяется геометрией узла и особенностями протекающих в нем электромагнитных процессов.

Обратить внимание на использование матрицы рассеяния узлов при решении разнообразных задач, на функциональные особенности того или иного СВЧ-узла, обуславливающие возможности его использования на практике.

### ***Контрольные вопросы***

1. Свойства Е- и Н-тройников с согласованными плечами. Распределение мощности между плечами во всех вариантах включения генератора.
2. Направленные ответвители: основные свойства, параметры и области применения.
3. Основные свойства двойного Т-образного моста, способы согласования плеч, применение.
4. Квадратный и кольцевой мосты: основные свойства, распределение мощности между плечами во всех вариантах включения генератора.
5. Щелевой мост: основные свойства, способы согласования, применение.
6. Делители мощности и балансные устройства СВЧ в микрополосковом исполнении.

### **1.2.14. Устройства СВЧ с намагниченными ферритами**

Необходимо знать: принцип построения волноводных устройств с ферритами, обладающими невзаимными свойствами.

*В волноводных трактах радиорелейных линий, приемников СВЧ используются вентили, пропускающие волну практически только в одном направлении и тем самым улучшающие согласование волновода с оконечными устройствами.*

Следует освоить принципы, на которых базируется работа резонансных вентилях и вентилях на смещении поля, а также невзаимных и взаимных фазовращателей, циркуляторов – трех- или четырехплечих невзаимных узлов, пропускающих волну между соседними плечами лишь в определенном направлении.

### ***Контрольные вопросы***

1. Вентили с поперечным ферромагнитным резонансом: принцип работы, устройство, параметры.
2. Вентили, базирующиеся на эффекте смещения поля: принцип работы, устройство, параметры.
3. Невзаимные и взаимные фазовращатели: принцип работы, устройство, параметры.
4. Циркуляторы. Примеры использования в функциональных устройствах СВЧ.
5. Циркулятор, основанный на эффекте Фарадея.
6. Фазовые циркуляторы: принцип работы, устройство, параметры.
7. Циркуляторы: принцип работы, устройство, параметры.

### 1.3. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

#### *Инструкция по выполнению контрольной работы*

Вариант задания определяется двумя последними цифрами номера студенческого билета:  $m$  – предпоследняя,  $n$  – последняя.

При выполнении контрольных работ необходимо придерживаться следующих требований:

1. Указать, прежде чем выполнять какой-либо расчет, его цель, привести ссылку на источник, откуда берете расчетные соотношения (номер литературы по списку), и номер формулы.
2. Пояснить все вновь вводимые значения.
3. Подставить в общую формулу числовые значения известных величин, привести результаты промежуточных вычислений и конечный результат. Размерности величин указать только в конечном результате расчета.
4. Выразить все величины в стандартных единицах Международной системы единиц СИ.
5. Выполнять расчеты с точностью до третьей значащей цифры.
6. Сопровождать рисунком с указанием направления векторов определение векторных величин.
7. Строить на миллиметровой бумаге графики, содержащие стандартный масштаб, размерности величин и расчетные точки. Рисунки должны быть разборчивыми.
8. Указывать при выполнении контрольной работы номер студенческого билета и номер варианта.
9. Представить в конце работы список использованной литературы и распечатать.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

**Задача 1.** Плоская однородная электромагнитная волна распространяется в безграничной полупроводящей среде вдоль оси  $z$ . Известны амплитуда напряженности электрического поля  $E_m$ , частота источника поля  $f$ , удельная проводимость среды  $\sigma$ , ее относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  и абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_a = \mu_0$  (табл. 1, 2).

Пользуясь данными соответствующего варианта, необходимо:

1. Определить коэффициент фазы  $\beta$  и коэффициент затухания  $\alpha$  распространяющейся волны.
2. Найти модуль  $|Z|$  и фазу  $\varphi$  комплексного волнового сопротивления  $Z$ .
3. Записать выражения для комплексных амплитуд и мгновенных значений напряженности электрического и магнитного полей.
4. Определить расстояние  $z_0$ , на котором амплитуда волны убывает в 1000 раз.
5. Вычислить значения фазовой скорости волны.
6. Найти длину волны в данной среде.

Таблица 1

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\varepsilon$	80	75	70	65	60	50	40	30	20	20
$f$ , МГц	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200

Таблица 2

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$E_m$ , В/м	50	60	70	80	90	100	105	110	115	120
$\sigma$ , См/м	2,0	4,0	5,0	6,0	10	15	10	6,0	8,0	4,0

При решении задачи следует помнить, что классификация сред по проводимости производится исходя из соотношения между плотностями токов проводимости и смещения.

Если плотности токов соизмеримы, то среда полупроводящая. В этом случае  $\beta$ ,  $\alpha$  и  $W$  зависят от электрических параметров среды и частоты электрических колебаний. От этих же величин зависят длина волны в исследуемой среде и фазовая скорость.

**Задача 2.** В волноводе с поперечными размерами  $a \times b$  или радиусом  $R$  (табл. 3, 4) требуется:

1. Определить критическую и выбрать рабочую длину волны в волноводе.
2. Изобразить распределение электрических и магнитных силовых линий вдоль соответствующих сторон волновода, заданного в табл. 6 типа волны. Нарисовать эскиз, иллюстрирующий распределение токов проводимости и токов смещения.



3. Изобразить на рисунке распределение токов проводимости продольные и поперечные излучающие щели.

4. Рассчитать передаваемую мощность, если амплитуда электрической составляющей поля в пучности равна 1 В/м, а также предельно допустимую мощность ( $E_{\text{проб}} = 3 \cdot 10^6$  В/м).

5. Определить типы волн, которые могут при выбранной длине волны распространиться в данном волноводе.

Таблица 3

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$a$ , м	0,02		0,04		0,06		0,08		0,05	
$b$ , м	0,01		0,01		0,03		0,04		0,05	
$R$ , м		0,02		0,04		0,06		0,03		0,08

Таблица 4

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип волны	$H_{10}$	$E_{11}$	$H_{20}$	$E_{12}$	$H_{21}$	$H_{21}$	$H_{11}$	$E_{22}$	$H_{12}$	$H_{11}$

Решение задачи целесообразно начинать с расчета критической волны для заданных размеров поперечного сечения и заданного типа волны. Воспользовавшись алгоритмом построения структуры поля для волны произвольного типа, изобразить распределение силовых линий в поперечном и продольном сечениях волновода.

**Задача 3.** Необходимо согласовать коаксиальную или двухпроводную линию, имеющую волновое сопротивление  $Z_B$  с активной нагрузкой  $R_H = qZ_B$  в полосе частот от  $f_H$  до  $f_B$ . Модуль коэффициента отражения  $|\Gamma|$  на входе перехода  $|\Gamma| \leq |\Gamma_{\text{доп}}|$ . Согласование произвести ступенчатым переходом с максимально плоской характеристикой.

Пользуясь данными соответствующего варианта (табл. 5, 6) требуется определить:

- 1) количество ступеней перехода  $N$  и его общую длину;
- 2) коэффициенты отражения от ступеней перехода  $\Gamma_i$ ;
- 3) волновые сопротивления  $Z_{B_i}$  и геометрические размеры каждой ступени (диаметр внутреннего проводника ступени  $r_i$  у коаксиала или расстояние между осями проводников  $2d_i$  в двухпроводной линии);
- 4) рассчитать и построить частотную зависимость в полосе частот от  $0,8f_H$  до  $1,2f_B$  при числе точек не менее 20.

Таблица 5

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Z_B, \text{Ом}$	200	250	300	50	70	75	280	350	50	75
$\varepsilon$	1	1	1	2,2	2,3	2,4	1	1	2,1	2,6
Тип линии	Двухпроводная			Коаксиальная			Двухпроводная		Коаксиальная	
$r, \text{мм}$	3,0	2,5	2,0				1,8	1,5		
$d, \text{мм}$				2,5	2,0	1,5			2,1	1,4

Таблица 6

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_B, \text{МГц}$	130	120	40	150	125	135	100	110	115	123
$f_H, \text{МГц}$	45	55	60	65	70	80	30	35	42	50
$q$	0,5	0,3	3,5	3,3	3,1	0,33	2,9	0,36	3,0	0,28
$ \Gamma_{\text{доп}} $	0,08	0,06	0,08	0,09	0,02	0,12	0,12	0,14	0,11	0,10

## **2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН И АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА**

### **2.1. СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ**

#### **2.1.1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

##### **Введение**

Цель, задачи и основное содержание курса «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства». Среда как элемент линии радиосвязи. Влияние Земли и ее атмосферы на распространение радиоволн. Ослабление и искажение сигналов. Основные определения. Классификация радиоволн по частотным диапазонам и механизмам распространения. Требования, предъявляемые к студентам, освоившим курс «РРВ и АФУ». Список рекомендуемой литературы.

##### **2.1.1.1. Распространение радиоволн в свободном пространстве**

Расчет напряженности поля. Потери и основные потери при распространении радиоволн непосредственно от пункта передачи к пункту приема, а также при наличии пассивной ретрансляции. Зоны Френеля. Область пространства, существенно участвующая в распространении радиоволн.

##### **2.1.1.2. Распространение земных радиоволн над плоской поверхностью Земли**

Поле излучателей, размещенных на конечной высоте над плоской границей раздела сред. Вывод интерференционного множителя и анализ диаграммы направленности вибратора с учетом подстилающей поверхности. Амплитуда поля в точке приема при скользящем РРВ. Вывод формулы Введенского и границы ее применения. Характеристика области подстилающей поверхности, существенной при отражении плоской волны. Виды рассеяния и учет шероховатости подстилающей поверхности при отражении ЭМВ. Критерий Рэлея и пределы применимости отражательной трактовки. Структура поля вертикального и горизонтального вибраторов, расположенных вблизи плоской границы раздела однородных сред. Эффективность излучения горизонтального вибратора вблизи реального диэлектрика. Функция ослабления поверхностной волны (функция Зоммерфельда) и анализ амплитудно-фазовой структуры поля в ближней и дальней зонах. Формула Шулейкина – Ван-дер-Поля. Ослабление поверхностной волны на трассах с кусочно-неоднородными параметрами подстилающей поверхности. Явление береговой рефракции. Учет влияния «погодного» слоя на РРВ. Виды подстилающих поверхностей.

### **2.1.1.3. Распространение земных волн над сферической поверхностью Земли**

Дальность прямой видимости. Учет сферичности в интерференционных формулах. Приведенные высоты антенн. Зоны света, тени и полутени. Дифракция радиоволн вокруг сферической поверхности Земли. Дифракционные формулы В. А. Фока. Работы В. А. Введенского, Ван-дер-Поля и других отечественных и зарубежных ученых. Амплитудная и фазовая коррекции дифракционного множителя. Методы расчета ослабления поля поверхностной волны с учетом сферической поверхности Земли.

### **2.1.1.4. РРВ с учетом тропосферы Земли**

Неоднородность электромагнитных свойств атмосферы на различных высотах. Строение тропосферы и ее электродинамические характеристики. Диэлектрическая проницаемость, коэффициент и индекс преломления тропосферы. Вертикальный профиль индекса преломления. Скорости распространения радиоволн – фазовая и групповая. Рефракция радиоволн в тропосфере. Искривление траектории луча и радиус кривизны траектории. Рефракция положительная и отрицательная. Виды положительной рефракции: нормальная, повышенная, пониженная, критическая, сверхрефракция. Определение условий сверхрефракции по вертикальному градиенту индекса преломления.

Ослабление радиоволн. Множитель ослабления. Поглощение в тропосфере – резонансное в газах и гидрометеорах. Механизм рассеяния радиоволн на локальных неоднородностях диэлектрической проницаемости атмосферы, рассеяние единичной неоднородностью, эффективная площадь рассеяния.

Учет влияния тропосферной рефракции в интерференционных формулах. Эквивалентный радиус Земли.

Замирания в тропосфере, их свойства и причины. Глубина замираний, интегральный закон распределения глубины замираний, скорость замираний. Методы повышения надежности работы линии радиосвязи путем использования пространственной, частотной, временной и поляризационной избирательностей замираний. Селективные замирания и неискаженная полоса частот.

### **2.1.1.5. РРВ с учетом ионосферы Земли**

Строение и электродинамические характеристики ионосферы. Источник и механизм ионизации. Процесс рекомбинации. Распределение свободных электронов по высоте. Диэлектрическая проницаемость и электропроводность ионосферы без учета магнитного поля Земли. Регулярные слои ионосферы *D*, *E* и *F*. Прогнозирование состояния ионосферы. Вертикальный профиль диэлектрической проницаемости ионосферы.

Микроструктура ионосферы. Статистические характеристики интенсивности и размеров неоднородностей на различных высотах. Преломление в ионосфере наклонно падающих лучей, условие поворота луча на Землю.

Влияние постоянного магнитного поля Земли на распространение волны в ионосфере. Максимальные частоты. Отражение от ионосферы вертикально

падающих лучей. Критическая частота. Частотная зависимость тензора проницаемости при РРВ вдоль геомагнитного поля. Эффект Фарадея.

Потери и затухание электромагнитной волны (ЭМВ) в ионосфере, распространение критических частот по высоте ионосферы. Особенности распространения плоской ЭМВ с линейной поляризацией вдоль нормали к геомагнитному полю. Двойное лучепреломление. Поглощение в ионосфере Земли. Гиромагнитная частота. Резонансное поглощение.

Замирания, их свойства и причины. Борьба с замираниями.

#### **2.1.1.6. Особенности распространения метровых, дециметровых и сантиметровых волн в пределах прямой видимости на наземных радиоприемниках**

Область применения. Распространение в пределах прямой видимости над холмистой местностью. Распространение при наличии единичных экранирующих препятствий. Явление «усиления» напряженности поля за счет препятствий. Учет влияния конечного числа препятствий на трассе РРВ. Распространение в условиях крупного города. Влияние тропосферы на условия РРВ.

#### **2.1.1.7. Регулярные механизмы распространения метровых, дециметровых и сантиметровых волн за пределы прямой видимости**

Область применения. Дальнее тропосферное распространение (ДТР). Объем рассеяния. Зависимость среднего значения напряженности поля от расстояния и частоты.

Количественная характеристика замираний при ДТР. Потеря усиления антенн при ДТР. Дальнее распространение метровых волн за счет отражения от ионизированных следов метеоров. Общие характеристики спорадических метеоров и их ионизированных следов.

Принцип работы линий радиосвязи, использующих эффект отражения радиоволн от ионизированных метеорных следов.

#### **2.1.1.8. Особенности распространения метровых, дециметровых и сантиметровых волн на линиях космической связи**

Особенности работы космических линий радиосвязи: большая протяженность трасс, ограничение уровня принимаемого сигнала нормами Международного союза электросвязи (МСЭ), применение наземных приемников с низким уровнем собственных шумов, перемещение искусственного спутника Земли (ИСЗ) по орбите. Зависимость потерь в тропосфере от частоты и угла места. Потери в ионосфере, вызванные эффектом Фарадея. Шумы, влияющие на работу космических радиоприемников, зависимость шумов от частоты и угла места. Влияние рефракции на работу радиоприемников; ошибки при траекторных измерениях; требования, предъявляемые к характеристикам направленности наземных антенн. Доплеровское изменение частоты. Принцип расчета линий космической связи.

### **2.1.1.9. Особенности распространения декаметровых волн**

Область применения декаметровых волн. Механизм и модели распространения. Распространение земной волны. Выбор рабочих частот, максимальные и наименьшие применимые частоты. Причины многолучевости. Интерференционные и поляризационные замирания.

Расчет напряженности поля по модернизированной методике А. Н. Казанцева. Влияние 11-летнего цикла солнечной активности. Влияние различного рода ионосферных возмущений.

### **2.1.1.10. Особенности распространения гектометровых, километровых и мириаметровых волн**

Области применения гектометровых волн. Земные волны, дальность распространения. Суточный ход характеристик поля. Закономерности изменения результирующего поля. Зоны ближних и дальних замираний. Методы борьбы с замираниями. Перекрестная модуляция в ионосфере.

Область применения километровых и мириаметровых волн. Распространение в сферическом волноводе «Земля – ионосфера». Анализ условий распространения. Особенности распространения, связанные с влиянием постоянного магнитного поля Земли. Методы расчета напряженности поля.

### **2.1.1.11. Нерегулярные механизмы распространения радиоволн различных диапазонов**

Сверхрефракция и возникновение тропосферных волноводных каналов. Определение множителя ослабления. Дальний прием телевидения за счет отражения радиоволн от нерегулярных образований в ионосфере (слой  $E_s$ ). Волноводное распространение в ионосфере.

## **2.1.2. АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА**

### **2.1.2.1. Основные параметры антенн. Элементарные излучатели**

Назначение приемной и передающей антенн в радиоканале. Основные характеристики. Классификация антенн. Векторная и комплексная характеристики направленности антенн. Амплитудная и фазовая диаграммы направленности (ДН). ДН в полярной и прямоугольной системах координат. Картографическое изображение ДН. Ширина основного лепестка ДН. Относительный уровень боковых лепестков ДН. Коэффициент защитного действия. Коэффициент направленного действия (КНД). Действующая длина и эффективная площадь антенны. Сопротивление излучения. Коэффициент полезного действия. Коэффициент усиления и его связь с КНД. Волновое сопротивление. Рабочая полоса частот, коэффициент перекрытия. Входное сопротивление. Фазовый центр. Элементарный электрический излучатель. Распределение тока. Поле излучения. Диаграмма направленности. Мощность излучения. Сопротивление излучения. Формула Рюденберга. Элементарный излучатель Гюйгенса. Метод зеркальных изображений.

### **2.1.2.2. Элементы общей теории антенн**

Принцип суперпозиции и его применение для анализа поля проволочных, щелевых и апертурных антенн. Амплитудно-фазовое распределение возбуждения (АФР). Линейная антенна с непрерывным распределением возбуждения: типы линейных антенн, используемые в технике; поле в дальней зоне; диаграмма направленности, правило перемножения ДН, множитель системы.

Влияние волновой длины и амплитудного распределения возбуждения на множитель системы. Влияние фазового распределения возбуждения на множитель системы: виды детерминированных фазовых распределений, влияние линейного, квадратичного и кубического фазовых распределений на ДН и КНД антенны.

Антенны с плоским излучающим раскрывом: типы антенн с плоским излучающим раскрывом, диаграмма направленности, множитель системы, КИП и КНД плоского раскрыва. Множитель системы, КИП и КНД раскрыва прямоугольной формы с разделяющимся АФР.

Диаграмма направленности, множитель системы, КИП и КНД круглого раскрыва с произвольным и осесимметричным АФР; влияние АФР и формы раскрыва на множитель системы. Излучение из раскрыва с произвольной формой, метод эквивалентной линейной антенны. Элементы статистической теории антенн и теории синтеза антенн. Отражательные характеристики антенн. Параметры антенн, определяющие электромагнитную совместимость.

### **2.1.2.3. Вибраторные антенны**

Типы вибраторных антенн, основные свойства и применение. Симметричный вибратор. Общие свойства, конструкции, области применения, распределение тока в плечах вибратора, поле в дальней зоне, ДН, ФД, КПД, КНД, сопротивление излучения, входное сопротивление. Способы расширения полосы пропускания. Питание симметричных вибраторов, симметрирующие устройства.

Несимметричный вибратор, конструкции, основные параметры, области применения. Линейный симметричный вибратор с плоским и линейным рефлектором, с линейным директором. Директорная антенна. Полосковые и микрополосковые антенны. Конструкции, общие свойства, применение. Микрополосковые антенны с прямоугольным излучателем. Принцип работы, ДН, ПД, КНД, КУ, согласование. Микрополосковые антенны с круговой поляризацией.

### **2.1.2.4. Антенны километровых, метрических и декаметровых волн**

Требования, предъявляемые к антеннам километровых, метрических и декаметровых волн. Антенны с нижним питанием. Антенны с регулируемым распределением тока. Антенны с верхним питанием. Антенны на низких опорах. Заземление антенн километровых и гектометровых волн.

Слабонаправленные антенны. Ромбические антенны. Логопериодические антенны. Приемные декаметровые антенны бегущей волны. Управление ДН декаметровых антенн.

### **2.1.2.5. Вибраторные антенны метровых и дециметровых волн**

Требования, предъявляемые к антеннам МВ и ДМВ. Основные типы антенн МВ и ДМВ диапазонов. Симметрирующе-согласующие устройства в антенной технике. Схема «запирающий цилиндр». Симметрирующая приставка (компенсационная схема). Петлевая схема (*U*-колени). Симметрирующая щель. Простейшие вибраторные антенны. Антенны для подвижных средств связи: вертикальный вибратор, дисконусная антенна. Петлевой вибратор (вибратор Пистолькорса). Многопетлевой вибратор.

### **2.1.2.6. Передающие телевизионные антенны**

Требования, предъявляемые к ДН передающих телевизионных антенн и их рабочей полосе частот. Вибратор Брауде. Трапециообразный вибратор. Ж-образный вибратор. Симметричный волновой вибратор с компенсационной схемой. Турникетная антенна и схема ее питания. Синфазное и переменноразностное питание передающих телевизионных антенн. Тангенциальный сдвиг систем вибраторов при опорах передающих центров большого поперечного сечения. Многоэтажные передающие телевизионные антенны и антенны ЧМ вещания.

### **2.1.2.7. Приемные телевизионные антенны**

Требования, предъявляемые к телевизионным приемным антеннам. Внешние и комнатные антенны. Антенна типа «волновой канал». Логоритмическая антенна. Простейшие приемные телевизионные антенны: симметричный вибратор, петлевой вибратор и его разновидности – «квадрат», «двойной квадрат», «зигзаг», «зигзаг» с резонансным и апериодическим рефлектором.

Спиральные антенны. Основные режимы работы, параметры.

### **2.1.2.8. Рупорные антенны**

Излучение открытого конца волноводов прямоугольного и круглого сечений. Секториальные, пирамидальные и конические рупоры; распределение амплитуд и фаз поля в раскрыве рупора. Диаграмма направленности. Оптимальные размеры рупора. Согласование рупора с волноводом.

Необходимость коррекции фазовых искажений в укороченных рупорных антеннах. Замедляющие, ускоряющие и геодезические линзы. Зонирование линз. Металлодиэлектрические линзы. Расчет корректирующих линз. Способы уменьшения реакции линз на рупор. Конструкция и типы антенн поверхностных волн.

Диэлектрическая стержневая антенна.

### **2.1.2.9. Зеркальные антенны**

Классификация антенн. Антенны с зеркалом в виде параболоида вращения. Принцип действия. Метод определения направленных свойств по распределению поля в излучающей апертуре и по распределению плотности тока на зеркале. Оптимизация параболической антенны. Учет влияния на ДН затенения



раскрыва зеркала облучателем.

Влияние поля, отраженного от зеркала, на облучатель и метод его устранения. Параболические антенны с вынесенным облучателем.

Двухзеркальные антенны. Антенна Кассегерена. Двухзеркальная антенна со смещенной фокальной осью и эллипсоидным зеркалом специальной формы (АДЭ). Двухзеркальная антенна Грегори.

Перископические антенны. Схемы и конструктивное исполнение. Принцип действия. Рупорно-параболическая антенна (РПА).

#### **2.1.2.10. Антенные решетки с управляемой диаграммой направленности**

Общие сведения о фазированных антенных решетках. Искажения диаграммы направленности при сканировании. Максимально допустимое расстояние между излучателями ФАР. Взаимное влияние элементов решетки. Требования, предъявляемые к излучателю. ФАР с фидерным питанием и пространственным (оптическим) питанием. Плавный и дискретно-коммутационный способы фазирования. Антенные решетки с частотным сканированием. Антенные решетки из активных излучателей. Понятие о многолучевых ретрансляционных решетках.

#### **2.1.2.11. Элементы фидерных трактов и их согласование**

Понятие многополюсника СВЧ. Матрица рассеяния многополюсника СВЧ. Классификация многополюсников СВЧ. Матрица рассеяния каскадно-соединенных четырехполюсников.

Структурная схема типового фидерного тракта. Задачи согласования в линиях передачи. Узкополосное и широкополосное согласование. Согласование с помощью одной реактивной неоднородности. Согласование с помощью четвертьволнового трансформатора. Многоступенчатые трансформаторы сопротивлений. Плавные трансформаторы сопротивлений.

Назначение и типы частотных фильтров СВЧ. Частотные характеристики, особенности частотных фильтров СВЧ в сравнении с низкочастотными прототипами.

Поляризационные фильтры и фильтры типов волн. Принципы и методы построения, назначение.

Применение направленных ответвителей и мостов СВЧ.

Вентили СВЧ, общие свойства, параметры и назначение.

Циркуляторы СВЧ, общие свойства, назначение. Конструкции, принцип работы, параметры циркуляторов. Применение циркуляторов.

Фазовращатели с использованием намагниченных ферритов, общие свойства, назначение, типы. Аналоговые взаимные и невзаимные фазовращатели, конструкции, свойства, применение. Дискретные взаимные и невзаимные фазовращатели, принцип построения многозвенных фазовращателей.

Устройства СВЧ на  $p-i-n$ -диодах. Отражательные и проходные фазовращатели на  $p-i-n$ -диодах. Применение  $p-i-n$ -диодов для построения управляемых аттенуаторов.

### 2.1.2.12. Эксплуатационные измерения антенно-фидерных устройств

Ориентация направленных антенн. Измерения параметров и настройка фидеров. Настройка антенн. Основные методы измерения ДН антенн: в дальней зоне, в ближней зоне, метод фокусировки.

## ЛИТЕРАТУРА

### Основная

1. Кочержевский, Г. А. Антенно-фидерные устройства / Г. А. Кочержевский, Г. А. Ерохин, Н. Д. Козырев. – М. : Радио и связь, 1989. – 351 с.
2. Чернышев, В. П. Антенно-фидерные устройства радиосвязи и радиовещания / В. П. Чернышев. – М. : Связь, 1978. – 288 с.
3. Шередько, Е. Ю. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства / Е. Ю. Шередько. – М. : Связь, 1976. – 184 с.
4. Грудинская, Г. П. Распространение коротких и ультракоротких волн / Г. П. Грудинская. – М. : Радио и связь, 1981. – 80 с.
5. Черный, Ф. Б. Распространение радиоволн / Ф. Б. Черный. – М. : Радио и связь, 1972. – 463 с.
6. Чернышев, В. П. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства / В. П. Чернышев, Д. И. Шейнман. – М. : Радио и связь, 1989. – 238 с.
7. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн: учеб. для вузов / Г. А. Ерохин [и др.] ; под ред. Г. А. Ерохина. – М. : Радио и связь, 1996. – 352 с.
8. Сазонов, Д. М. Антенны и устройства СВЧ / Д. М. Сазонов. – М. : Высш. шк., 1988. – 432 с.
9. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн: учеб. пособие / Г. А. Ерохин [и др.] ; под ред. Г. А. Ерохина. – М. : Горячая линия-телеком, 2004. – 404 с.
10. Вольман, В. И. Техническая электродинамика / В. И. Вольман, Ю. В. Пименов. – М. : Связь, 1971, 2002. – 352 с.
11. Гололобов, Д. В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства: метод. пособие для студ. спец. 450102 «Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения» днев. и вечер. форм обучения: Ч. 1. Распространение радиоволн / Д. В. Гололобов, В. Б. Кирильчук. – Минск : БГУИР, 2004. – 124 с.
12. Гололобов, Д. В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства: метод. пособие для студ. спец. 450102 «Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения» днев. и вечер. форм обучения: Ч. 2. Фидерные устройства / Д. В. Гололобов, В. Б. Кирильчук. – Минск : БГУИР, 2005. – 299 с.

13. Гололобов, Д. В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства: метод. пособие для студ. спец. 450102 «Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения» днев. и вечер. форм обучения: Ч. 3. Антенны / Д. В. Гололобов, В. Б. Кирильчук, О. А. Юрцев. – Минск : БГУИР, 2006. – 180 с.
14. Юрцев, О. А. Элементы общей теории антенн : метод. пособие по курсу «Антенны и устройства СВЧ» для студ. спец. «Радиотехника». В 3 ч. Ч. 1 / О. А. Юрцев. – Минск : БГУИР, 1997. – 110 с.
15. Юрцев, О. А. Резонансные и апертурные антенны. : метод. пособие по курсу «Антенны и устройства СВЧ» для студ. спец. «Радиотехника». В 3 ч. Ч. 2 / О. А. Юрцев. – Минск : БГУИР, 2001. – 92 с.
16. Юрцев, О. А. Антенны бегущей волны, антенные решетки, антенны коротких, средних и длинных волн. : метод. пособие по курсу «Антенны и устройства СВЧ» для студ. спец. «Радиотехника». В 3 ч. Ч. 1 / О. А. Юрцев. – Минск : БГУИР, 2001. – 74 с.
17. Антенны : метод. указания к лабораторным работам по дисц. «Антенны и устройства СВЧ» / О. А. Юрцев [и др.]. – Минск : БГУИР, 2008. – 74 с.
18. Численное моделирование проволочных антенн : метод. пособие для курсового и дипломного проектирования по дисц. «Антенны и устройства СВЧ» / О. А. Юрцев [и др.]. – Минск : БГУИР, 2002. – 69 с.

#### Дополнительная

19. Грудинская, Г. П. Распространение радиоволн / Г. П. Грудинская. – М. : Связь, 1975. – 280 с.
20. Фейнберг, Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности / Е. Л. Фейнберг. – М. : АН СССР, 1972. – 411 с.
21. Долуханов, М. П. Распространение радиоволн / М. П. Долуханов. – М. : Связь, 1972 – 336 с.
22. Айзенберг, Г. З. Антенны ультракоротких волн / Г. З. Айзенберг [и др.]. – М. : Связь, 1977. – 384 с.
23. Бова, Н. Т. Антенны и устройства СВЧ / Н. Т. Бова, Г. Б. Резников. – Киев : Вища школа, 1982. – 278 с.
24. Фельд, Я. Н. Основы теории антенн / Я. Н. Фельд, Л. С. Бененсон. – М. : Дрофа, 2007. – 206 с.
25. Фрадин, А. З. Антенно-фидерные устройства / А. З. Фрадин. – М. : Связь, 1977. – 440 с.
26. Козырев, Н. Д. Антенны космической связи / Н. Д. Козырев. – М. : Радио и связь, 1990. – 195 с.
27. Драбкин, А. Л. Антенны / А. Л. Драбкин, Е. Б. Коренберг, С. Е. Меркулов. – М. : Радио и связь, 1995. – 152 с.
28. Ямпольский, В. Т. Оптимизация антенных систем линий связи / В. Т. Ямпольский, Д. П. Фролов. – М. : Радио и связь, 1991. – 384 с.
29. Лобкова, Л. М. Распространение радиоволн над морской поверхностью / Л. М. Лобкова. – М. : Радио и связь, 1991. – 253 с.

30. Неганов, В. А. Теория и применение устройств СВЧ / В. А. Неганов, Г. П. Яровой. – М. : Радио и связь, 2006. – 321 с.

31. Жук, М. С. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных трактов / М. С. Жук, Ю. Б. Молочков. – М. : Энергия, 1972. – 442 с.

Библиотека БГУИР

## **2.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**

### **2.2.1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

#### **Введение**

Необходимо понимать современную классификацию радиоволн по частотным диапазонам и механизмам распространения.

Знать: обобщенную схему канала связи и критерий оценки его качества; цель и задачи дисциплины «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства».

Иметь представление о возникающих искажениях сигналов при распространении радиоволн в околоземном пространстве.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Обобщенная схема канала связи и характеристика ее составных компонентов.
2. Классификация радиоволн по частотным диапазонам.
3. Характеристика радиоволн по механизмам распространения.
4. Основные виды искажений сигналов при распространении радиоволн в околоземном пространстве.

#### **2.2.1.1. Распространение радиоволн в свободном пространстве**

Необходимо знать: формулу расчета напряженности поля, основных потерь при распространении радиоволн непосредственно от пункта передачи к пункту приема, а также при наличии пассивной ретрансляции. Зоны Френеля.

Иметь представление об области пространства, существенно участвующей в распространении радиоволн.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Формулы для расчета амплитудного и действующего значений напряженности электрического поля при распространении радиоволн в свободном пространстве.
2. Основные виды потерь в канале связи при распространении радиоволн между пунктами приема и передачи.
3. Определение первой и высших зон Френеля.
4. Формула для определения радиуса произвольной зоны Френеля при заданных расстояниях от передатчика и приемника.
5. Определение существенной и минимальной зон при распространении радиоволн.

### **2.2.1.2. Распространение земных радиоволн над плоской поверхностью Земли**

Необходимо знать: свойства плоской волны, распространяющейся в неограниченной полупроводящей среде; выражения коэффициентов распространения и поглощения волн при различных соотношениях между токами проводимости и смещения; представлять картину отражения радиоволн от поверхности Земли.

Необходимо иметь четкое представление о коэффициентах отражения и прохождения электромагнитных волн при падении на плоскую, гладкую границу раздела сред (коэффициентах Френеля) и их зависимости от вида поляризации, угла падения и частоты поля. Знать суть приближенных граничных условий Леонтовича – Щукина.

Следует уяснить связь между напряженностью поля в свободном пространстве и полем в реальных условиях. Иметь представление о видах рассеяния и методике учета шероховатости подстилающей поверхности при отражении ЭМВ. Знать критерий Рэлея и пределы применимости отражательной трактовки.

Необходимо четко понимать смысл термина «поднятая антенна» и условия применимости лучевой трактовки при определении множителя ослабления. Для случая поднятых антенн необходимо усвоить вывод интерференционного множителя и методику его преобразования на случай скользящего распространения радиоволн.

Необходимо знать суть формул множителя ослабления, условий их применимости, формулы Шулейкина – Ван-дер-Поля и определения численного расстояния; представлять картину распространения волны над трассой из двух однородных участков и графика множителя ослабления для трассы из трех однородных участков.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Формулы для расчета коэффициентов отражения и прохождения электромагнитных волн при падении на плоскую, гладкую границу раздела сред (коэффициентов Френеля).
2. Зависимость коэффициентов Френеля от вида поляризации, угла падения и частоты поля.
3. Сущность приближенных граничных условий Леонтовича – Щукина.
4. Виды рассеяния и методика учета шероховатости подстилающей поверхности при отражении ЭМВ.
5. Критерий Рэлея и пределы применимости отражательной трактовки.
6. Определение интерференционного множителя.
7. Формулы для множителя ослабления для различных типов подстилающих поверхностей.
8. Особенности расчета дифракционного поля в различных диапазонах волн.
9. Множитель ослабления и напряженность поля в областях полутени и тени.

### **2.2.1.3. Распространение земных волн над сферической поверхностью Земли**

*Сферичность земной поверхности ограничивает дальность прямой видимости между корреспондирующими точками, а следовательно вносит дополнительное ослабление в поле распространяющейся волны по сравнению со случаем РРВ над плоской подстилающей поверхностью.*

Необходимо понимать: формулу определения дальности прямой видимости, связанную с высотами подвеса антенн корреспондирующих пунктов, расчета напряженности поля при РРВ над сферической поверхностью Земли.

Необходимо знать понятия: зоны света, тени и полутени, приведенные высоты приемной и передающей антенн, формулы для расчета приведенных высот в различных зонах.

Иметь четкое представление о физической сути дифракции радиоволн вокруг сферической поверхности Земли и возможности применения дифракционной формулы В. А. Фока.

Знать одночленную дифракционную формулу и область ее применимости, уметь пользоваться графиками для расчета поля земных волн; методику расчета ослабления поля поверхностной волны с учетом сферической поверхности Земли.

Необходимо четко представлять особенности расчета дифракционного поля в различных диапазонах волн, уметь вычислять множитель ослабления и напряженность поля в областях полутени и тени.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Формула определения дальности прямой видимости.
2. Критерии границ зон света, тени и полутени.
3. Формулы для расчета приведенных высот в зонах света и полутени.
4. Суть дифракции радиоволн вокруг сферической поверхности Земли.
5. Использование одночленной дифракционной формулы.
6. Отличия вычислений множителя ослабления и напряженности поля в областях полутени и тени.
7. Методика расчета ослабления поля поверхностной волны с учетом сферической поверхности Земли.

### **2.2.1.4. РРВ с учетом тропосферы Земли**

Необходимо знать: строение тропосферы и ее электродинамические модели; связь физических характеристик тропосферы (температура, давление, влажность) с электродинамическими (диэлектрическая проницаемость, коэффициент и индекс преломления), а также вертикальный профиль их изменения в нормальных и аномальных условиях.

Необходимо иметь представление: о причинах тропосферной рефракции и ее видах; о причинах возникновения волноводного механизма РРВ-сверхрефракции; о методике определения условий сверхрефракции по верти-

кальному градиенту индекса преломления; классификацию видов и причин ослабления радиоволн в тропосфере. Знать, как связан радиус траектории радиолуча с градиентом индекса преломления. Иметь представление о механизмах рассеяния радиоволн на локальных неоднородностях диэлектрической проницаемости атмосферы, рассеянии единичной неоднородностью, эффективной площади рассеяния и множителе ослабления.

Обратить внимание на методику учета тропосферной рефракции в интерференционных формулах и расчета эквивалентного радиуса Земли при заданном виде тропосферной рефракции.

Знать классификацию замираний в тропосфере, их свойства и причины, а также методы повышения надежности работы линии радиосвязи за счет использования пространственной, частотной, временной и поляризационной избирательностей замираний.

### **Контрольные вопросы**

1. Связь диэлектрической проницаемости, коэффициента и индекса преломления тропосферы.
2. Определение понятия рефракции.
3. Виды рефракции.
4. Параметр, определяющий вид тропосферной рефракции.
5. Виды замираний сигналов в тропосфере и причины их возникновения.
6. Суть методов борьбы с замираниями сигналов.

#### **2.2.1.5. РРВ с учетом ионосферы Земли**

Необходимо изучить способы исследования верхних слоев атмосферы, ее состав, механизм и источники ионизации, распределение ионизации по высоте однородной атмосферы, знать суть процессов ионизации и рекомбинации, а также распределение свободных электронов по высоте. Аналитическая форма представления диэлектрической проницаемости и электропроводности ионосферы без учета магнитного поля Земли. Регулярные слои ионосферы  $D$ ,  $E$  и  $F$ .

Обязательно знать процессы распространения радиоволн в однородном ионизированном газе, его эквивалентные параметры при наличии постоянного магнитного поля. Максимальные частоты. Отражение от ионосферы вертикально падающих лучей. Критическая частота. Частотная зависимость тензора проницаемости при РРВ вдоль геомагнитного поля. Эффект Фарадея.

Необходимо знать: формулы для определения потерь и затухания ЭМВ в ионосфере; распространение критических частот по высоте ионосферы; особенности распространения плоской ЭМВ с линейной поляризацией вдоль нормали к геомагнитному полю.

Обратить внимание на процессы двойного лучепреломления, поглощение в ионосфере Земли, формулы определяющие гиромагнитную частоту, эффекты замирания, их свойства и причины, методы борьбы с ними.



### ***Контрольные вопросы***

1. Модель строения и состав ионосферы.
2. Основные источники ионизации.
3. Связь в условиях электродинамического равновесия интенсивности ионизации и рекомбинации носителей заряда в ионосфере Земли.
4. Суть электронной концентрации носителей заряда в ионосфере Земли.
5. Частота Ленгмюра.
6. График высотной зависимости распределения электронной концентрации реальной атмосферы.
7. Характеристика ионизированных слоев.
8. Критическая частота.
9. Максимально применимая частота.
10. Эффект Фарадея при РРВ в ионосфере Земли.
11. Суть эффекта двойного лучепреломления в ионосфере Земли.
12. Причины поглощения ЭМВ в ионосфере Земли.
13. Гиромагнитная частота.
14. Причины резонансного поглощения ЭМВ в ионосфере Земли.
15. Виды замираний сигналов в ионосфере Земли и причины их возникновения.
16. Суть методов борьбы с замираниями сигналов в ионосфере Земли.

#### **2.2.1.6. Особенности распространения метровых, дециметровых и сантиметровых волн в пределах прямой видимости на наземных радиоприемных линиях**

Необходимо знать: процесс формирования поля поднятой антенны над плоской землей, интерференционные формулы, методы учета влияния сферичности земной поверхности; простейший метод учета влияния рефракции в интерференционных и дифференциальных формулах – введение понятия эквивалентного радиуса Земли; физические причины рассеяния, замирания и описывающие их законы; процессы при ионосферном рассеянии УКВ и при их отражении от метеорных следов.

Для расчета амплитуды отраженной волны надо знать критерий Релея.

### ***Контрольные вопросы***

1. Интерференционные формулы и область их применимости.
2. Учет влияния рефракции. Эквивалентный радиус Земли и его применение в интерференционных и дифракционных формулах.
3. Учет сферичности земной поверхности. Приведенные высоты и способы их вычисления.
4. Виды замираний при тропосферном рассеянии радиоволн и их причины.
5. Влияние отражения от метеорных следов на дальность связи.

### **2.2.1.7. Регулярные механизмы распространения метровых, дециметровых и сантиметровых волн за пределы прямой видимости**

Рассмотреть принцип организации дальнего тропосферного распространения (ДТР) за счет заданного объема рассеяния. Следует рассмотреть отдельно два случая для слабонаправленной и остронаправленной антенн. В первом случае объем ограничен пятью высотами поднятия антенн, во втором случае необходимо использовать модель параллелепипеда, образованного пересечением диаграмм направленности приемной и передающей антеннами.

При изучении замираний четко понимать медианные значения напряженности поля, физические причины его колебания. Рассмотреть стандартные отклонения от медианных значений.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Объем рассеяния при использовании слабонаправленных антенн.
2. Объем рассеяния при использовании остронаправленных антенн.
3. Замирания при ДТР.
4. Стандартные отклонения от медианных значений.

### **2.2.1.8. Особенности распространения метровых, дециметровых и сантиметровых волн на линиях космической связи**

Широкое развитие космической связи вызывает необходимость изучения характеристик межпланетной среды и особенностей РРВ и характерных отличий космических радиолиний от наземных (влияние атмосферы, выбор рабочих частот, электромагнитная совместимость с другими линиями того же диапазона частот).

#### ***Контрольные вопросы***

1. Виды космических радиолиний и их значение для современной науки и техники.
2. Влияние тропосферы. Рефракция. Поглощение радиоволн. Ограничение рабочих частот сверху.
3. Влияние ионосферы. Искривление траекторий. Поглощение волн и их отражение от ионосферы. Нижняя граница рабочих частот. Вращение плоскости поляризации.
4. Особенности космических линий: рефракция, доплеровское изменение частоты, увеличенное время распространения.
5. Учет взаимного влияния космических и наземных радиолиний (электромагнитная совместимость).

### **2.2.1.9. Особенности распространения декаметровых волн**

Необходимо знать: физические процессы при распространении коротких волн, роли различных слоев ионосферы; свойства замираний и меры борьбы с ними, зависимость распространения коротких волн от суточных, сезонных и геометрических возмущений; особенности распространения средних волн в дневные и ночные часы.

Низкая частота, присущая длинным и сверхдлинным волнам, повышает роль земной волны и дает возможность отражения от нижнего слоя ионосферы. Необходимо знать особенности распространения земной и ионосферной волн и методы расчета напряженности поля.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Основной способ распространения коротких волн. Функции слоев ионосферы.
2. Физические причины, ограничивающие диапазон рабочих частот. Изменение этого диапазона в течение суток и года.
3. Природа замираний, их виды, количественная оценка их свойств. Меры борьбы с замираниями.
4. Зона молчания. Зависимость положения ее границ от частоты, времени суток и года.
5. Области ионосферы, участвующие в распространении средних волн.
6. Ближние и дальние замирания. Меры борьбы с ними.
7. Изменение напряженности поля в течение суток и года. Влияние ионосферных возмущений.
8. Области ионосферы, отражающие сверхдлинные и длинные волны.
9. Распространение в сферическом волноводе между Землей и нижней границей ионосферы.
10. Изменение условий распространения в течение суток и года.

### **2.2.1.10. Особенности распространения гектометровых, километровых и мириаметровых волн**

Необходимо знать: преимущества и недостатки использования данных диапазонов длин волн (частотная емкость, скорость передачи информации, максимальное удаление приемника и пр.).

Изучить существующие области формирования поля, его зависимость от времени суток. Обратить внимание на эффект антипода.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Область применения волн ОНЧ и НЧ диапазонов.
2. Преимущества и недостатки диапазона.
3. Особенности областей формирования поля.
4. Эффект антипода.
5. Суточные и сезонные замирания сигналов.

### **2.2.1.11. Нерегулярные механизмы распространения радиоволн различных диапазонов**

Основным нерегулярным механизмом распространения УВЧ и СВЧ диапазонов является сверхрефракция, при которой энергия волны переносится далеко за горизонт. В ОВЧ диапазоне распространение на большие расстояния обусловлено влиянием слоев ионосферы и возникающих спорадических слоев. Возникающие наклоны ионосферного слоя могут привести к рикашетирующему и волноводному распространению на ВЧ.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Нерегулярные механизмы распространения на УВЧ и СВЧ.
2. Нерегулярные механизмы распространения на ОВЧ.
3. Нерегулярные механизмы распространения на ВЧ.

### **2.2.2. АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА**

#### **2.2.2.1. Основные параметры антенн. Элементарные излучатели**

Необходимо знать: характеристики и параметры антенн.

*Основной характеристикой антенн является ее диаграмма направленности (ДН) – зависимость напряженности электрического поля от угла поворота антенны. Графически она может представляться в полярной или декартовой системе координат, в том числе, и в логарифмическом виде. Необходимо иметь представление об оценочных параметрах ДН – угле, соответствующем максимальному излучению, ширине ДН по половинной мощности, максимальном уровне боковых лепестков. Следует обратить внимание на поляризационную структуру излучаемой волны, т. е. на поляризационную характеристику (рассмотреть виды поляризации). Изучить параметры антенн – коэффициент направленного действия, КПД, коэффициент усиления, входное сопротивление. Отдельно изучить частотную характеристику антенны.*

Необходимо изучить свойства элементарных источников излучения – диполь Герца, магнитный диполь и элемент Гюйгенса.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Определение ДН антенны.
2. Определение поляризационной характеристики антенны.
3. Определение КНД антенны.
4. Определение КПД антенны.
5. Определение коэффициента усиления антенны.
6. Входное сопротивление антенны и принципы согласования с нагрузкой.
7. Частотная характеристика антенны.
8. Диполь Герца.
9. Элементарный магнитный излучатель.
10. Элемент Гюйгенса.

### **2.2.2.2. Элементы общей теории антенн**

Необходимо знать: принцип суперпозиции и его применение для анализа поля проволочных, щелевых и апертурных антенн; понятие амплитудно-фазового распределения возбуждения (АФР), определяющее решение внешней задачи.

Следует также рассмотреть влияние фазового распределения возбуждения на множитель системы: виды детерминированных фазовых распределений, влияние линейного, квадратичного и кубического фазовых распределений на ДН и КНД антенны.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Суть принципа суперпозиции в теории антенн.
2. Применение принципа суперпозиции для проволочных антенн.
3. Применение принципа суперпозиции для щелевых антенн.
4. Применение принципа суперпозиции для апертурных антенн.
5. Амплитудное распределение токов (напряженности поля) на антенне.
6. Фазовое распределение токов (напряженности поля) на антенне.
7. Суть решения внутренней задачи антенны.
8. Суть решения внешней задачи антенны.
9. Влияние АФР на ДН антенны.
10. Влияние АФР на КНД антенны.

### **2.2.2.3. Вибраторные антенны**

Материал темы полностью опирается на знание элементарных излучателей. Необходимо рассмотреть зависимость КНД от волновой длины вибратора, их ДН. Рассмотреть вопрос об улучшении направленных свойств и широкополосности вибраторных антенн. Изучить конструкции антенн Уда-Яги и логопериодической антенны.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Антенны по направленности, приближаемые к идеальным элементарным излучателям.
2. Диапазонные свойства вибраторных антенн.
3. Распределение тока вдоль симметричного электрического вибратора.
4. Основные параметры симметричного вибратора.
5. Отличие несимметричного вибратора от симметричного.
6. Учет взаимного влияния линейных электрических вибраторов.
7. Поле излучения и электрические характеристики системы двух параллельных полуволновых вибраторов.
8. Поле излучения турникетной антенны.

#### **2.2.2.4. Антенны километровых, мириаметровых и декаметровых волн**

Следует изучить требования, предъявляемые к антеннам километровых, мириаметровых и декаметровых волн. Отдельно рассмотреть антенны с нижним питанием, с регулируемым распределением тока, с верхним питанием.

В данной теме необходимо изучить целый класс антенных устройств, объединенных одним общим признаком – наличием бегущей волны поля. Принцип действия таких антенн, несмотря на их различное конструктивное выполнение, одинаков. Поэтому при изучении данной темы необходимо обратить внимание на единство подхода при изучении, например, спиральных и диэлектрических антенн, проводной антенны бегущей волны и ромбической и т. д.

##### ***Контрольные вопросы***

1. Особенность линейной системы излучателей при изменении фаз по закону бегущей волны с замедленной разовой скоростью.
2. Работа однопроводной антенны бегущей волны.
3. Свойства ромбической антенны.
4. Параметры и характеристики направленности директорной антенны.
5. Свойства многоэлементных антенн бегущих волн.

#### **2.2.2.5. Вибраторные антенны метровых и дециметровых волн**

Изучить требования, предъявляемые к антеннам МВ и ДМВ, их типы. Сделать акцент на вопросы согласования антенн с фидером «запирающий цилиндр»; симметрирующую приставку,  $U$ -колена, симметрирующую щель и стакан. Изучить способы расширения полосы рабочих частот.

##### ***Контрольные вопросы***

1. Требования, предъявляемые к МВ и ДМВ антеннам.
2. Принцип действия «запирающего цилиндра».
3. Принцип действия симметрирующей приставки.
4. Принцип действия  $U$ -колена.
5. Принцип действия симметрирующей щели и стакана.
6. Способы расширения полосы частот антенн МВ и ДМВ диапазонов.

#### **2.2.2.6. Передающие телевизионные антенны**

Изучить требования, предъявляемые к ДН передающих телевизионных антенн и их рабочей полосе частот, конструкции передающих телеантенн.

##### ***Контрольные вопросы***

1. Требования, предъявляемые к передающим телевизионным антеннам.
2. Конструкция вибратора Брауде.
3. Конструкция трапециообразного и Ж-образного вибраторов.

4. Турникетная антенна и схема ее питания.
5. Многоэтажные передающие телевизионные антенны и антенны ЧМ вещания.

### **2.2.2.7. Приемные телевизионные антенны**

Изучить требования, предъявляемые к телевизионным приемным антеннам, конструкции внешних и комнатных антенн.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Требования, предъявляемые к телевизионным приемным антеннам.
2. Конструкция антенны типа «волновой канал».
3. Логопериодическая антенна.
4. Симметричный вибратор, петлевой вибратор.
5. Антенны «квадрат», «двойной квадрат», «зигзаг», «зигзаг» с резонансным и аперриодическим рефлектором.

### **2.2.2.8. Рупорные антенны**

Важно усвоить тему, посвященную излучению открытого конца волновода. Только после этого целесообразно переходить к изучению рупорных, линзовых и зеркальных антенн. Необходимо обратить внимание на выбор оптимальных размеров при расчете этих антенн. Основные закономерности в распределении поля в раскрыве апертурных антенн и диаграммы направленности кроме того экспериментально изучаются в процессе выполнения лабораторных работ. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов поможет студенту лучше понять материал данной темы.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Коэффициент направленного действия для антенны, излучающей поверхностью, расположенной перпендикулярно направлению максимального излучения.
2. Поле излучения и коэффициент направленного действия открытого конца прямоугольного волновода.
3. Типы рупорных антенн и структура поля в их раскрывах.
4. Оптимальные размеры рупорных антенн.
5. Расчет поверхности линзовых антенн.
6. Типы линзовых антенн.
7. Методы уменьшения отражений электромагнитной волны от линзы.
8. Принцип построения антенны с однородными фокусирующими линзами.

### **2.2.2.9. Зеркальные антенны**

Необходимо знать: классификацию антенн; характеристики и параметры антенн с зеркалом в виде параболоида вращения; метод определения направленных свойств по распределению поля в излучающей апертуре и по распределению плотности тока на зеркале, оптимизации параболической антенны; влияние на ДН затенения раскрыва зеркала облучателем.

Иметь представление о влиянии поля, отраженного от зеркала, на облучатель и метод его устранения, о параболических антеннах с вынесенным облучателем.

Необходимо знать: характеристики и параметры двухзеркальной антенны Кассегерена, антенны со смещенной фокальной осью и эллипсоидным зеркалом специальной формы (АДЭ), антенны Грегори.

Знать принцип работы, схемы и конструктивное исполнение перископических и рупорно-параболических антенн (РПА).

#### ***Контрольные вопросы***

1. Устройство параболической антенны, ее свойства.
2. Методы расчета характеристики излучения параболической антенны.
3. Разновидности зеркальных антенн для получения специальных диаграмм направленности.
4. КНД зеркальной антенны.
5. Физический смысл КИП зеркальной антенны.
6. Характеристики и параметры антенны при смещении облучателя в фокальной плоскости.
7. Характеристики и параметры антенны при смещении облучателя по фокальной оси.
8. Конструкция антенны Кассегерена.
9. Конструкция антенны Грегори.
10. Принцип действия перископической антенны.

### **2.2.2.10. Антенные решетки с управляемой диаграммой направленности**

Необходимо знать: типичные для антенной техники распределения источников с точки зрения направленности действия; основные принципы построения антенн по заданным параметрам; возможности построения антенн с диаграммой направленности различной формы, с управляемой диаграммой направленности.

Следует обратить внимание, что техническая реализация распределения источников может быть самой разнообразной.

Изучение материала строится по принципу «от простого к сложному»: от одиночных элементарных излучателей, изученных в предыдущем разделе, к изучению системы этих излучателей – сначала дискретной системы, затем – непрерывной. Рассматриваются системы с равномерными амплитудными и фазовыми распределениями, а затем с неравномерными.



### ***Контрольные вопросы***

1. Классификация и принцип действия антенных решеток.
2. Связь диаграммы направленности излучателя с множителем решетки.
3. Принцип построения ФАР.
4. Ограничения пространственного сканирования.
5. Способы фазирования излучателей ФАР.

#### **2.2.2.11. Элементы фидерных трактов и их согласование**

Необходимо рассмотреть компоненты матрицы рассеяния многополюсника СВЧ и уяснить их физический смысл. Рассмотреть необходимость решения задачи согласования, обеспечивающей эффективность работы тракта СВЧ. Подробно изучить методы согласования сопротивлений линий передачи и нагрузки с применением круговой диаграммы Вольперта – Смитта. Изучить методы формирования геометрических размеров полосковых линий при реализации фильтров СВЧ. Внимательно изучить параметры направленных ответвителей, их конструкции для различных линий передачи. При изучении устройств СВЧ на основе ферритов тщательно рассмотреть зависимость поля подмагничивания на резонансное поведение проходящей волны.

### ***Контрольные вопросы***

1. Физический смысл составляющих матрицы рассеяния.
2. Суть задачи согласования.
3. Определение сопротивления и проводимости по круговой диаграмме Вольперта – Смитта.
4. Согласование с применением круговой диаграммы Вольперта – Смитта.
5. Фильтры: классификация, реализация для различных линий передачи.
6. Направленные ответвители: классификация, реализация для различных линий передачи.
7. Принцип действия ферритовых устройств.

#### **2.2.2.12. Эксплуатационные измерения антенно-фидерных устройств**

Необходимо знать: методы измерения характеристик и параметров антенн, а также их юстировки для оптимизации канала радиосвязи; способы крепления фидерных трактов, построения мачт и башен; методику настройки фидерных линий и антенн.

### ***Контрольные вопросы***

1. Методы контроля и измерения параметров и характеристик антенн.
2. Требования к конструкциям антенн.
3. Принцип юстировки антенн.
4. Способы крепления фидерных опор, мачт, башен.

## 2.3. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

### *Инструкция по выполнению контрольной работы*

Контрольные задания составлены в 100 вариантах. Каждый студент выполняет одну контрольную работу. Вариант задания определяется двумя последними цифрами номера студенческого билета:  $m$  – предпоследняя цифра,  $n$  – последняя.

При выполнении контрольной работы необходимо придерживаться следующих требований:

1. Указать, прежде чем выполнять какой-либо расчет, его цель, привести ссылку на источник, откуда берете расчетные соотношения (номер литературы по списку), и номер формулы.
2. Пояснить все вновь вводимые значения.
3. Подставить в общую формулу числовые значения известных величин, привести результаты промежуточных вычислений и конечный результат. Размерности величин указать только в конечном результате расчета.
4. Выразить все величины в стандартных единицах Международной системы единиц СИ.
5. Выполнять расчеты с точностью до третьей значащей цифры.
6. Сопровождать рисунком с указанием направления векторов определение векторных величин.
7. Строить графики на миллиметровой бумаге. Они должны содержать стандартный масштаб, размерности величин и расчетные точки. Рисунки должны быть разборчивыми.
8. Указывать при выполнении контрольной работы номер студенческого билета и номер варианта.
9. Представить в конце работы список использованной литературы и расписаться.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

**Задача 1.** Над однородной подстилающей поверхностью Земли, характеризуемой удельной электропроводностью  $\sigma$ , относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ , магнитной проницаемостью  $\mu_a = \mu_0$  на высотах соответственно  $h_T$  и  $h_R$ , установлены приемная и передающая антенны. Передающая антенна с коэффициентом усиления  $G_T$  в режиме идеального согласования подключена к передатчику с помощью фидера длиной  $l_T$  с погонным затуханием  $\alpha_T$  и волновым сопротивлением  $Z_{0T}$ . На выходе согласованного с фидером передатчика на несущей частоте  $f_T$  формируется узкополосный фазоманипулированный сигнал мощностью  $P_T$  полосой частот  $\Delta f_{\%} = 15$ . Приемник подключен к приемной антенне, коэффициент усиления которой на частоте  $f_T$  имеет значение  $G_R$ , с помощью фидера длиной  $l_R$ , погонным затуханием  $\alpha_R$  и волновым сопротивлением  $Z_{0R} = Z_{rec}$ , где  $Z_{rec}$  – входное сопротивление приемника на частоте  $f_T$ . Входное сопротивление антенны на частоте  $f_T$  чисто активное, равно  $R_R$ . Передающая антенна излучает сигнал на поляризации типа  $p_m$  ( $m = 0, 1$  – вертикальная;  $m = 2$  – горизонтальная). Приемная антенна по отношению к передающей имеет поляризационное рассогласование, характеризваемое величиной  $\alpha_p$  (см. табл. 1А, Б).

Пренебрегая влиянием атмосферы (верхнее полупространство-вакуум) и пользуясь данными соответствующего варианта, необходимо:

1. Определить мгновенное значение напряженности электрического поля  $E_m$  на расстоянии  $R_0$  от передающей антенны.
2. Определить мощность сигнала на входе приемника на частоте  $f_T$ .
3. Построить график зависимости действующего значения напряженности электрического поля  $E_p(R)$  от расстояния  $R$ , если  $0,5R_0 \leq R \leq 5R_0$ .
4. Определить коэффициент стоячей волны по напряжению в приемном фидере в полосе рабочих частот.
5. Определить расстояние, начиная с которого напряженность электрического поля от расстояния будет убывать монотонно.

Таблица вариантов 1А

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\varepsilon$ ,	80	10	5	4	15	20	25	9	8	7
$\sigma$ , Сим/м	10	0,1	0,01	0,05	1	2	3	0,1	0,1	0,1
$f_T$ , МГц	100	200	70	50	100	200	100	200	100	90
$\alpha_T$ , дБ/м	0,5	0,8	0,3	0,2	0,5	0,8	0,5	0,8	0,5	0,4
$h_T$ , м	50	20	70	60	50	20	40	15	35	65

Окончание табл. 1А

$l_T$ , м	50	20	70	60	50	20	40	15	35	65
$G_T$ , дБ	12	15	10	6	12	15	12	18	10	8
$P_T$ , Вт	10	15	20	40	60	50	70	35	45	70
$Z_{0T}$ , Ом	75	50	50	75	75	50	50	75	75	75
$p_m$	1	2	2	1	1	1	2	2	1	2
$R_0$ , км	30	20	40	45	50	55	60	65	50	40

Табл. 1Б

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$h_R$ , м	50	60	70	70	40	100	90	40	35	35
$l_R$ , м	50	60	70	70	40	100	90	40	35	35
$\alpha_R$	0,01	0,02	0,012	0,015	0,013	0,014	0,013	0,014	0,015	0,011
$Z_{0R}$ , Ом	50	75	50	75	50	75	50	75	50	75
$G_R$ , дБ	10	12	11	15	13	12	10	17	14	13
$\alpha_p$ , дБ	0,5	1	2	1,5	1,7	1,3	1,4	1,6	1,5	0,9

При решении этой задачи следует помнить о том, что коэффициенты отражения Френеля зависят от вида поляризации поля, и что поверхность земли имеет сферическую форму.

**Задача 2.** Пирамидальная рупорная антенна (ПРА), выполненная из идеально проводящего материала, запитана от прямоугольного волновода с поперечными размерами  $a \times b$ , имеет раскрыв с размерами  $A \times B$ , требуется (см. табл. 2А, Б):

1. Определить рабочий диапазон частот ПРА.
2. Определить глубину (длину) рупора, при которой данный рупор будет оптимальным.
3. Рассчитать коэффициент направленного действия ПРА на средней рабочей частоте диапазона.
4. Изобразить графически эпюры распределения векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  вдоль соответствующих сторон рупора. Нарисовать эскиз, иллюстрирующий распределение токов проводимости и токов смещения.
5. Для заданных размеров рассчитать и построить диаграмму направленности ПРА в двух ортогональных плоскостях на средней рабочей частоте диапазона.
6. Рассчитать передаваемую мощность, если амплитуда электрической составляющей поля в пучности равна 1 В/м, а также предельно допустимую мощность ( $E_{проб} = 3 \cdot 10^6$  В/м).

Таблица вариантов 2А

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$A, \text{ м}$	0,7	0,7	0,9	0,2	0,15	0,6	0,08	0,9	0,12	0,4
$B, \text{ м}$	0,5	0,7	0,6	0,2	0,10	0,3	0,06	0,5	0,6	0,22

Табл. 2Б

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$a, \text{ м}$	0,023	0,023	0,046	0,072	0,072	0,023	0,072	0,046	0,072	0,023
$b, \text{ м}$	0,01	0,01	0,02	0,036	0,036	0,01	0,036	0,02	0,036	0,01

Решение задачи целесообразно начинать с определения диапазона рабочих частот антенны и графического изображения структуры поля волны заданного типа. После этого необходимо записать условие допустимой фазовой ошибки на краях ПРА и определить его оптимальную глубину.

**Задача 3.** Необходимо согласовать и симметризовать вибраторную и антенну, характеризуемую входным импедансом  $Z_A = R + jX$ , с коаксиальным фидером с заданным значением волнового сопротивления  $Z_0$  в полосе частот от  $f_H$  до  $f_B$ . Согласование и симметризование следует произвести с помощью ступенчатого четвертьволнового трансформатора и четвертьволновой приставки – вариант  $N$  или  $U$ -колена – вариант  $M$  (см. табл. 3А, Б).

Требуется определить:

1. Конструкцию и размеры заданного типа согласующее-трансформирующего устройства (СТУ).
2. Коэффициент отражения в полосе частот от  $0,8 f_H$  до  $1,2 f_B$  при числе точек не менее 20.

Таблица вариантов 3А

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Z_0, \text{ Ом}$	100	25	150	50	70	75	80	50	75	25
Вариант СТУ	$M$	$N$	$M$	$N$	$M$	$N$	$N$	$N$	$N$	$M$

Таблица 3Б

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_B, \text{ ГГц}$	0,5	0,7	0,23	0,174	0,47	0,608	0,518	0,708	0,47	0,23
$f_H, \text{ ГГц}$	0,45	0,63	0,174	0,15	0,35	0,5	0,43	0,67	0,33	0,174
$R, \text{ Ом}$	30	45	80	150	200	30	25	120	190	25
$X, \text{ Ом}$	+30	+45	-70	-80	+70	+60	-45	-95	+45	+50

**Задача 4.** Необходимо определить размеры резонатора на заданном типе колебаний  $H_{mnl}$  или  $E_{mnl}$  на заданной рабочей частоте  $f$  (см. табл 4А, Б). Зарисовать конструкцию резонатора и метод его возбуждения.

Таблица вариантов 4А

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Конструкция резонатора	Призматический					Цилиндрический				
Тип колебаний	$H_{101}$	$H_{112}$	$H_{102}$	$E_{111}$	$E_{121}$	$H_{111}$	$H_{121}$	$H_{011}$	$H_{112}$	$E_{012}$

Таблица 4Б

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частота $f$ , ГГц	16	17	18	9	10	13	14	15	36	37
Метод возбуждения	Штырь			Петля			Штырь			

Библиотека БГУИР

### **3. ОСНОВЫ РАДИОФИЗИКИ**

#### **3.1. СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ**

##### **Введение**

Предмет, цель и задачи дисциплины, ее взаимосвязь с другими дисциплинами. Содержание дисциплины «Основы радиофизики», ее место в подготовке инженера по специальности 1-39 03 01 «Электронные системы безопасности».

Информация и ее носители. Использование в качестве носителя информации электромагнитного излучения.

##### **3.1.1. Характеристики и свойства электромагнитного излучения**

Электромагнитное излучение как носитель информации. Классификация электромагнитного излучения в соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи (МСЭ). Частота, длина волны, поляризация, групповая и фазовая скорости. Особенности электромагнитных волн с точки зрения теории колебаний и электродинамики. Характеристика инфракрасного, оптического, ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучений. Волновые и квантовые свойства электромагнитного излучения.

##### **3.1.2. Основные законы электродинамики**

Электромагнитное поле (ЭМП): описание, виды, характеристики. Основы теории формирования, распространения и поглощения электромагнитных колебаний. Уравнения Максвелла для электромагнитного поля в неподвижной среде. Закон полного тока, закон электромагнитной индукции. Физическое содержание уравнений Максвелла. Классификация сред. Потери в средах. Теорема Умова – Пойнтинга.

##### **3.1.3. Особенности распространения радиоволн по диапазонам частот**

Способы распространения радиоволн (РРВ). Законы Снелля (Снеллиуса). РРВ в различных средах. Дифракция волн. Особенности распространения радиоволн в СДВ, ДВ, СВ, КВ, УКВ. Влияние тропосферы и ионосферы на процесс РРВ. Виды рефракций. Максимально применимая частота.

##### **3.1.4. Каналы радиосвязи и их характеристика**

Принцип передачи и приема сигналов по радиоканалам. Несущая частота, модуляция, модулированный сигнал и его излучение антенной. Детектирование и фильтрация модулированного сигнала при его приеме. Формирование каналов передачи информации с применением ретрансляторов. Общая характеристика каналов спутниковой, радиорелейной и сотовой связи. Радиовещание, гражданская (служебная) и радиолюбительская связь. Влияние на радиосвязь промышленных и естественных помех.

### **3.1.5. Спутниковые каналы передачи информации**

Использование спутниковых каналов передачи информации в электронных системах безопасности (ЭСБ). Глобальные системы позиционирования GPS, А-GPS, ГЛОНАСС (Россия) и их применение в ЭСБ. Магистральная спутниковая связь Intelsat, Eutelsat, VSAT, Глобалстар. Система безопасности АСКРО на атомных электростанциях. Спутниковый мониторинг движения транспортных средств и объектов.

### **3.1.6. Общая характеристика аппаратных узлов телекоммуникационных каналов ЭСБ**

Линии передачи в ЭСБ. Классификация и основные параметры линий передачи. Паразитные параметры линий передачи. Характеристика проводных и волоконно-оптических каналов передачи информации. Телекоммуникационные (беспроводные) каналы передачи информации, достоинства и недостатки при их использовании в ЭСБ. Общая характеристика функциональных элементов радиоканалов для ЭСБ. Использование аналоговых и цифровых сигналов в телекоммуникационных каналах. Передающие и приемные устройства, источники питания. Классификация, характеристики и параметры антенн. Конструктивные особенности антенн в зависимости от диапазона радиочастот. Особенности элементов, устройств и узлов канала радиосвязи СВЧ-диапазона.

### **3.1.7. Основы проектирования телекоммуникационных каналов связи в ЭСБ**

Выбор вида радиолинии, частотного диапазона радиоволн, используемых сигналов для передачи информации (аналоговый, цифровой), мощности передатчика, конструкции приемопередающей антенны, способов электропитания при проектировании ЭСБ. Учет функционального назначения ЭСБ, защищаемого объекта и его особенностей, условий прохождения радиоволн, влияния возможных помех от промышленных и естественных источников. Влияние компоновки ЭСБ (централизованная, децентрализованная) на выбор телекоммуникационных каналов и их функциональных элементов.

## **ЛИТЕРАТУРА**

Основная

1. Кураев, А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Сеницын. – Минск : Бестпринт, 2004. – 357 с.
2. Вольман, В. Н. Техническая электродинамика / В. Н. Вольман, Ю. В. Пименов, А. Д. Муравцов. – М. : Радио и связь, 2002. – 352 с.
3. Гололобов, Д. В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства : метод. пособие для студ. спец. 1-45 01 02 «Системы радиосвязи,



радиовещания и телевидения» днев. и вечер. форм обуч. Ч. 1–2 / Д. В. Гололобов, В. Б. Кирильчук. – Минск : БГУИР, 2005 ; 2006. – 124 с., 299 с.

4. Баскаков, И. С. Электродинамика и распространение радиоволн / И. С. Баскаков. – М. : Высш. шк., 1993. – 438 с.

5. Конструирование экранов и СВЧ-устройств / А. М. Чернушенко [и др.]. – М. : Радио и связь, 1990. – 350 с.

6. Шапиро, Д. Н. Основы теории электромагнитного экранирования / Д. Н. Шапиро. – Л. : Энергия, 1975. – 348 с.

Дополнительная

7. Фальковский, О. И. Техническая электродинамика / О. И. Фальковский. – М. : Связь, 1978. – 342 с.

8. Фельдштейн, А. Л. Справочник по элементам волноводной техники / А. Л. Фельдштейн, Л. П. Явич, В. П. Смирнов. – М.–Л. : Госэнергоиздат, 1963; 1967. – 532 с.

9. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры / Б. Ф. Высоцкий [и др.]. – М. : Сов. радио, 1977. – 208 с.

10. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения / Л. М. Лыньков [и др.]. – Минск : БГУИР, 2000. – 356 с.

11. Численное моделирование процессов : метод. указания к лаб. работам по курсу «Электродинамика и распространение радиоволн» для студ. спец. «Радиотехника» / О. А. Юрцев [и др.]. – Минск : БГУИР, 2002. – 69 с.

## 3.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

### Введение

Целью дисциплины является изучение основ электромагнитной теории, лежащей в основе формирования излучений радиодиапазона, его использования в качестве носителя сигнала и основ проектирования телекоммуникационных и радиоканалов, используемых для обеспечения взаимосвязи составных частей в ЭСБ. Задачи дисциплины состоят в усвоении характеристик и свойств электромагнитного излучения, законов описания электромагнитных полей, особенностей радиосвязи и распространения радиоволн различных частотных диапазонов, принципов построения спутниковых каналов передачи информации.

Необходимо знать: формулу, связывающую частоту электромагнитной волны и длину волны, а также ограничения по диапазонам этих величин, установленным МСЭ. Иметь представление об информационных электромагнитных полях (ЭМП).

### *Контрольные вопросы*

1. Связь частоты и длины электромагнитной волны.
2. Основные характеристики ЭМП.
3. Задачи и цель излучения дисциплины.

#### **3.2.1. Характеристики и свойства электромагнитного излучения**

Необходимо иметь представление о колебании и волне. Рассмотреть простейшие колебания, которые могут быть описаны аналитически с помощью ряда Фурье. Уяснить, что информационные колебания имеют случайный характер и поэтому могут быть описаны с помощью теории статистической радиотехники. Дать классификацию электромагнитных полей: стационарных, монохроматических, случайных. Рассмотреть пространственную характеристику волн – поляризацию, ее виды: линейную, круговую, эллиптическую. Разобраться с понятием фазовой скорости (скорости перемещения фронта волны), знать формы фронта волны. Групповую скорость определить как группу фазовых скоростей группы волн, связать ее со скоростью перемещения энергии волны. Отдельно рассмотреть особенности характеристики инфракрасного, оптического, ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучений.

### *Контрольные вопросы*

1. Определение колебания и волны.
2. Обобщенный ряд Фурье и его коэффициенты.
3. Определение плотности вероятности.
4. Определение матожидания и дисперсии случайного процесса.
5. Классификация ЭМП.

6. Поляризация волны: виды, методы формирования и измерения.
7. Определение фазовой и групповой скорости волны.
8. Характеристики инфракрасного излучения.
9. Характеристики оптического излучения.
10. Характеристики ультрафиолетового излучения.
11. Характеристики рентгеновского излучения.
12. Характеристики гамма-излучения.

### 3.2.2. Основные законы электродинамики

Необходимо знать: дескрипторы электродинамики – векторы электромагнитного поля, их размерности; материальные уравнения, классификацию сред; физический смысл уравнений Максвелла, их запись в дифференциальной, интегральной и комплексной формах.

Изучая уравнения Максвелла, надо уметь классифицировать электромагнитные явления по характеру их изменения во времени (переменные, статические, стационарные и квазистационарные поля).

Необходимо разбираться в понятии «граница раздела сред». Обратит внимание на то, что в общем случае граница является криволинейной, а электромагнитная волна падает на границу под произвольным углом. Поэтому следует проводить анализ нормальных и тангенциальных составляющих ЭМП.

Необходимо знать: составляющие баланса энергии в ЭМП; физический смысл вектора Умова – Пойнтинга; теорему Умова – Пойнтинга.

Волновые уравнения определяют характер распространения ЭМВ. Поэтому следует разобраться в аналитическом представлении этого процесса с учетом и без учета потерь.

### *Контрольные вопросы*

1. Определение векторов электромагнитного поля  $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{\delta}$ .
2. Физический смысл первого и второго уравнений Максвелла.
3. Ток проводимости и ток смещения.
4. Третье и четвертое уравнения Максвелла и их физический смысл.
5. Уравнение непрерывности и закон сохранения заряда.
6. Классификация электромагнитных явлений по характеру их изменения во времени.
7. Определение границы раздела сред.
8. Условия для тангенциальных составляющих поля на границе раздела двух сред.
9. Условия для нормальных составляющих поля на границе раздела двух сред.
10. Поверхностный ток и поверхностная плотность заряда.
11. Определение вектора Умова – Пойнтинга.
12. Баланс энергий ЭМП.
13. Формулировка теоремы Умова – Пойнтинга.

### **3.2.3. Особенности распространения радиоволн по диапазонам частот**

Необходимо знать: способы (механизмы) распространения волн: прямая и земная волны, тропосферное и ионосферное распространение волн, волноводное и поверхностное распространение волн.

При изучении вопросов, связанных с падением волны на границу раздела сред с различными параметрами, следует уяснить законы Снелля и вводимые при этом коэффициенты отражения и прохождения (коэффициенты Френеля).

Раздельно изучить особенности распространения радиоволн по диапазонам частот: СДВ, ДВ и СВ – механизмы, дальность действия, потери мощности и эффекты; КВ – влияние ионосферных слоев, замирания, эффекты; УКВ – число станций, выбор модуляции, механизмы распространения, влияние неоднородностей, эффекты.

Обратить внимание на явление дифракции электромагнитных волн и методы решения задач дифракции (приближение Гюйгенса – Кирхгофа, геометрической оптики, метод краевых волн), изучить явление рефракции с применением законов Снелля, а также виды рефракций.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Механизмы распространения радиоволн.
2. Законы Снелля (Снеллиуса).
3. Коэффициенты отражения (Френеля) для волн с различными поляризациями.
4. Особенности распространения волн СДВ- и ДВ- диапазонов.
5. Особенности распространения волн СВ-диапазона.
6. Особенности распространения волн КВ-диапазона.
7. Особенности распространения волн УКВ-диапазона.
8. Явление дифракции электромагнитных волн. Приближенные решения дифракционных задач.
9. Условия применимости геометрической оптики. Изменение интенсивности поля вдоль луча в приближении геометрической оптики.
10. Условия применимости физической оптики. Приближения физической оптики.
11. Понятие рефракции.
12. Виды рефракции.

### **3.2.4. Каналы радиосвязи и их характеристика**

Изучение принципа передачи и приема сигналов посредством радиоволн сводится к рассмотрению структурной схемы канала радиосвязи. Необходимо знать схему передающего устройства, формирующего модулированные колебания, возникающие за счет мультипликативного перемножения несущего (высокочастотного) и модулирующего (низкочастотного, информационного) сигналов. В результате такого преобразования возникают комбинационные частоты, содержащиеся в спектре радиосигнала. После дополнительного усиления по мощности радиосигнал преобразуется в электромагнитную волну с помощью

антенны. На приемном конце после селекции и усиления модулированного сигнала производится его детектирование, заключающееся в извлечении информационного (низкочастотного) сигнала.

Необходимо разобраться с принципом построения спутниковых каналов информации. Обратит внимание на выбор частоты, обеспечивающий реализацию прямой волны при прохождении через слои атмосферы. При изучении ретрансляционной линии передачи данных разобраться с дуплексным принципом и многоканальной передачей информации. При создании ЭСБ возможно использование сотовых систем связи. Поэтому следует знать принцип реализации сотовой связи: поколения систем, выбор частот, размеров сот и среднюю плотность потока мощности в соте и др.

Работа радиоканалов в современных условиях сопровождается воздействием различных помех. Следует рассмотреть влияние промышленных, естественных и преднамеренных помех на радиотракты.

### ***Контрольные вопросы***

1. Назначение блоков структурной схемы канала радиосвязи.
2. Принцип работы модулятора.
3. Назначение передающей и приемной антенны.
4. Цепи селекции каналов информации.
5. Принцип детектирования.
6. Принцип построения спутникового канала радиосвязи.
7. Расстояние прямой видимости.
8. Особенности построения радиорелейных линий.
9. Принцип организации сотовой связи.
10. Действие промышленных и атмосферных помех на радиоканал.

### **3.2.5. Спутниковые каналы передачи информации**

При дистанционном контроле определенной информации на объектах требуется скоростная передача данных о состоянии объекта в реальном режиме времени, а иногда и привязка территории. В этом случае используются существующие спутниковые и телекоммуникационные каналы, обеспечивающие достоверную передачу данных о состоянии объекта. При необходимости привязки к местности, контроле точного времени используются глобальные системы позиционирования GPS, А-GPS, ГЛОНАСС. Изучая эти системы, следует обратить внимание на погрешности передачи данных, которые могут возникнуть из-за влияния помех, нерационального выбора параметров для передачи данных, влияния слоев атмосферы и пр. В качестве примеров рекомендуется рассмотрение системы безопасности АСКРО на атомных электростанциях, обеспечивающей контроль радиационной обстановки на всех атомных станциях России и спутниковый мониторинг движения транспортных средств и объектов.

### ***Контрольные вопросы***

1. Принцип действия GPS.
2. Принцип действия A-GPS.
3. Принцип действия ГЛОНАСС.
4. Особенности построения системы АСКРО.
5. Принцип организации мониторинга транспортных средств и объектов.
6. Требования к радиосигналам спутниковой связи.

#### **3.2.6. Общая характеристика аппаратных узлов телекоммуникационных каналов ЭСБ**

Необходимо знать: классификацию и основные параметры линий передачи; электродинамические параметры волновода с прямоугольным и круглым сечением, коаксиальных и микрополосковых линий.

Изучить алгоритмы построения поля волны произвольного типа в волноводах с заданным сечением, знать основные типы волн в коаксиальных и микрополосковых линиях передачи, их структуру и основные параметры.

Особое внимание обратить на изучение физических принципов работы устройств СВЧ, позволяющих проводить их расчет по эквивалентным схемам с сосредоточенными параметрами. Изучить устройства для ответвления энергии СВЧ, регулировки мощности проходящей волны, сложения и разделения сигналов, измерений и коммутаций в трактах СВЧ. Знать матрицу рассеяния – основу для анализа устройств СВЧ.

Необходимо знать: принципы построения вентиляей, пропускающих волну практически только в одном направлении; циркуляторы – трех- или четырехплечие невзаимные узлы, пропускающие волну между соседними плечами лишь в определенном направлении; использование циркуляторов в качестве вентиляей, согласованных полосовых и режекторных фильтров, переключателей фильтров разделительных и ряда других устройств.

*При изучении антенн следует сконцентрировать внимание на усвоении их характеристик и параметров – диаграммы направленности, поляризационной и частотной характеристик, входного сопротивления, коэффициентов направленного действия, усиления, полезного действия и др. Провести четкую связь при решении внутренней и внешней задачи антенны и установить взаимосвязь решения этих задач в соответствии с принципом суперпозиции в теории антенн.*

Знать основные принципы построения антенн СВЧ- и КВЧ-диапазонов: рупорные, зеркальные, линзовые, антенные решетки.

### ***Контрольные вопросы***

1. Классификация линий передачи.
2. Структура поля и параметры волн  $T$ -типа в коаксиальных линиях.

3. Структура полей и основные параметры волн типа  $E$  и  $H$  в прямоугольном и круглом волноводах.
4. Алгоритм построения поля волны произвольного типа в прямоугольном волноводе.
5. Токи на стенках волноводов при распространении различных типов волн.
6. Структура полей и условия их существования в коаксиальной линии.
7. Параметры микрополосковых линий.
8. Способы сочленения волноводов и коаксиальных линий.
9. Устройство Т-образных волноводных ответвителей, дроссельных фланцевых соединений и короткозамыкающих поршней прямоугольного волновода.
10. Атенюаторы поглощающие и предельные; согласованные нагрузки.
11. Направленные ответвители: основные свойства, параметры и области применения.
12. Основные свойства двойного Т-образного моста, способы согласования плеч, применение.
13. Невзаимные и взаимные фазовращатели: принцип работы, устройство, параметры.
14. Формы представления диаграмм направленности антенн.
15. Поляризационная характеристика (диаграмма) антенны.
16. Входное сопротивление антенны.
17. Рупорные антенны: основы построения, особенности, характеристики и параметры.
18. Зеркальные антенны: основы построения, особенности, характеристики и параметры.
19. Антенные решетки: основы построения, особенности, характеристики и параметры.

### **3.2.7. Основы проектирования телекоммуникационных каналов связи в ЭСБ**

Необходимо знать: принцип выбора вида радиолинии, определяющий частотный диапазон радиоволн, использование вида сигналов для передачи информации; методику расчета параметров, обеспечивающих оценки потерь мощности, связанные с протяженностью радиотрассы, в зависимости от типа линии.

Уметь обосновать выбор вида сигнала для передачи информации, имеющей определенный спектр; в зависимости от диапазона частот для несущей осуществляется выбор антенны по критерию минимизации габаритно-массовых параметров, особым требованиям к антеннам (выступающая антенна, парусность, система как часть антенны и пр.).

Необходимо знать, как произвести оценку воздействия помех и излучений на общие параметры и характеристики ЭСБ.

*Следует учитывать, что современная ЭСБ должна содержать систему позиционирования и специальный телекоммуникационный канал, обеспечивающие концентрацию информации в едином пункте контроля состояния объекта или объектов.*

### ***Контрольные вопросы***

1. Условия выбора типа линии передач.
2. Параметры оценки качества передачи информации.
3. Условия выбора вида сигнала для передачи информации.
4. Выбор антенны в зависимости от диапазона частот.
5. Алгоритм оценки воздействия помех на параметры и характеристики ЭСБ.
6. Требования к структурному составу ЭСБ.

Библиотека БГУИР



### 3.3. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

#### *Инструкция по выполнению контрольной работы*

Контрольные задания составлены в 100 вариантах. Вариант задания определяется двумя последними цифрами номера студенческого билета:

$m$  – предпоследняя,  $n$  – последняя.

При выполнении контрольных работ необходимо придерживаться следующих требований:

1. Указать, прежде чем выполнять какой-либо расчет, его цель, привести ссылку на источник, откуда берете расчетные соотношения (номер литературы по списку), и номер формулы.
2. Пояснить все вновь вводимые значения.
3. Подставить в общую формулу числовые значения известных величин, привести результаты промежуточных вычислений и конечный результат. Размерности величин указать только в конечном результате расчета.
4. Выразить все величины в стандартных единицах Международной системы единиц СИ.
5. Выполнять расчеты с точностью до третьей значащей цифры.
6. Сопровождать рисунком с указанием направления векторов определенных векторных величин.
7. Графический материал представлять в стандартизированной координатной сетке с размерами ячейки, определяемыми студентом. Размерный размах осей определяется так, чтобы наблюдалась динамика изменений исследуемой величины. Оси графиков должны быть обозначены соответствующими величинами с обязательным указанием их размерности. Допускается представление зависимостей при вариациях третьего (и более) параметра на одном графике при условии ранжирования линий по цвету или их виду.
8. Указывать при выполнении контрольной работы номер студенческого билета и номер варианта.
9. Представить в конце работы список использованной литературы и расписаться.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

**Задача 1.** Определить количество информационных каналов с заданным видом модуляции, которые могут быть размещены в ДВ, СВ, КВ, УКВ-диапазонах с шириной спектра сигнала  $\Pi_C$  и относительной полосой  $\Delta F$ . Защитный интервал между каналами принять равным  $\Delta f_3$  (табл. 1).

Таблица 1

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вид модуляции	АМ	ЧМ	ФМ	АМ	ЧМП	ФМП	АМП	ЧМ	ФМ	АМ
$\Pi_C$ , кГц	5	10	15	20	30	2	10	6	40	50
$\Delta F$ , %	10	15	20	25	30	20	40	30	20	10
$\Delta f_3$ , кГц	10	20	30	40	50	10	20	30	40	50

АМ, ФМ, ЧМ – амплитудная, частотная, фазовая модуляция; АМП, ЧМП, ФМП – амплитудная, частотная, фазовая манипуляция

Определить мощность радиосигнала при известных параметрах несущего и модулирующего сигналов (табл. 2):  $U_0$  – амплитуда несущего колебания;  $M$ ,  $\beta$  – коэффициент и индекс модуляции.

Таблица 2

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_0$ , В	10	60	20	30	90	10	40	10	15	20
$M$ , %	20	25	40	10	15	25	10	45	28	34
$\beta$	2	4	1	1,5	2,5	10	5	8	4	3

**Задача 2.** Корреспондирующие пункты расположены на расстоянии  $r$  друг от друга. Передающее устройство имеет фиксированную мощность  $P_{\Pi}$ , несущую частоту  $f_0$  и ширину спектра  $\Pi_C$  (табл. 3, 4).

Необходимо:

1. При заданном коэффициенте затухания  $\alpha$  осуществить выбор типа фидера.
2. Рассчитать мощность на приемном конце проводной линии.
3. Предложить альтернативный способ передачи информации с помощью электромагнитных волн: определить действующее значение напряженности поля на приемном конце, мощность на входе приемника.
4. Сравнить радио- и проводную линии передачи информации, определить эффективность использования вариантов линий.

Таблица 3

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$r$ , км	5000	2600	7000	18000	90000	1000	11000	120	1300	14000

Таблица 4

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{II}$ , кВт	2	10	4	20	6	50	8	10	5	30
$f_0$ , МГц	1	2	3	4	30	500	40	1000	15	5000
$P_C$ , кГц	10	20	500	4	100	20	10	80	40	200

**Задача 3.** Задана вольт-амперная характеристика диода амплитудного детектора, аппроксимированная отрезками прямых:

$$i = \begin{cases} SU & \text{при } u \geq 0, \\ 0 & \text{при } u < 0. \end{cases}$$

На вход детектора воздействует амплитудно-модулированное колебание:

$$U_{am}(t) = U_0(1 + M \cos 2\pi Ft) \cos 2f_0 t.$$

Таблица 5

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S$ , мА/В	30	35	40	45	50	55	60	67	70	75
$K_d$	0,9	0,7	0,8	0,6	0,7	0,8	0,7	0,6	0,9	0,7

Таблица 6

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$M$	0,8	0,85	0,9	0,7	0,6	0,5	0,7	0,6	0,5	0,8
$U_0$ , В	1	1,2	1,4	1,6	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,2
$f_0$ , кГц	300	350	400	450	500	550	60	650	700	750
$F$ , кГц	4	5	6	4	5	6	7	5	4	6

Необходимо:

1. Объяснить назначение, изобразить схему и описать принцип работы детектора.
2. Рассчитать необходимое значение сопротивления нагрузки детектора  $R_H$  для получения значения коэффициента передачи детектора  $K_d$ .
3. Выбрать значение емкости нагрузки детектора  $C_H$  при заданных  $f_0$  и  $F$ .
4. Рассчитать и построить спектры напряжений на входе и выходе детектора.

**Задача 4.** Для заданной ЭСБ (табл. 7) требуется:

1. Привести описание датчика и схемы преобразования электрического сигнала.
2. Представить структурную схему системы.
3. Привести вариант системы с применением Интернет.

Таблица 7

<i>m</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вид датчика	Счетчик Гейгера			Терморезистор			Радиосигнал		Видеокамера	
Система	АСКРО			РРЛ*	СРЛ	ТЛЛ	A-GPS	GPS	СРЛ	РРЛ

\*Радиолинии: РРЛ – радиорелейная; СРЛ – спутниковая; ТЛЛ – телефонная

При описании предмета задачи следует пояснить принцип действия обозначенной системы и ее периферийных датчиков, а также преобразователей неэлектрической информации в электрический сигнал. Привести структурную схему системы с аналитическим описанием.

Библиотека БГУИР

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВОЛНЫ .....</b>	<b>4</b>
1.1. Содержание программы .....	4
Литература.....	6
1.2. Методические рекомендации .....	8
1.3. Контрольные задания .....	15
Инструкция по выполнению контрольной работы .....	15
Контрольная работа.....	16
<b>2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН И АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА .....</b>	<b>19</b>
2.1. Содержание программы .....	19
Литература.....	26
2.2. Методические рекомендации .....	29
2.3. Контрольные задания .....	42
Инструкция по выполнению контрольной работы .....	42
Контрольная работа.....	43
<b>3. ОСНОВЫ РАДИОФИЗИКИ.....</b>	<b>47</b>
3.1 Содержание программы.....	47
Литература.....	48
3.2. Методические рекомендации .....	50
3.3. Контрольные задания .....	57
Инструкция по выполнению контрольной работы .....	57
Контрольная работа.....	58

*Учебное издание*

**Гололобов Дмитрий Владимирович**  
**Кирильчук Валерий Борисович**

***ОСНОВЫ РАДИОФИЗИКИ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ  
РАДИОВОЛН И АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА***

*ПОСОБИЕ*

Редактор *И. В. Ничипор*  
Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоля*

Подписано в печать 01.04.2013. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 3,84. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 150 экз. Заказ 347.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6