

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра радиотехники

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ  
РАДИОВОЛН**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Институт радиоэлектроники

Специальность подготовки дипломированного специалиста:  
210302.65 - радиотехника

Направление подготовки бакалавра:  
210302.62 - радиотехника

Санкт-Петербург  
Издательство СЗТУ  
2009

Утверждено редакционно-издательским советом университета

УДК 621.371

**Электродинамика и распространение радиоволн:** учебно-методический комплекс / сост. Л.Я. Родос, Д.А. Чистяков. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2009. - 154 с.

Учебно-методический комплекс (УМК) разработан в соответствии с требованиями государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования.

В УМК рассмотрены вопросы теории электромагнитного поля, основные методы решения прикладных задач электродинамики применительно к распространению электромагнитных волн в направляющих системах и радиоволн на естественных трассах.

УМК предназначен для студентов специальности 210302.65, изучающих дисциплину «Электродинамика и распространение радиоволн», и бакалавров техники и технологии по направлению 210302.62, изучающих эту же дисциплину.

Рассмотрено на заседании кафедры радиотехники 06.10.2008 г., одобрено методической комиссией института радиоэлектроники 23.10.2008 г.

Рецензенты: кафедра радиотехники СЗТУ (зав. кафедрой Г.И. Худяков, д-р техн. наук, проф.); В.С. Калашников, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр. ВНИИРА.

Составители: Л.Я. Родос, канд. техн. наук, доц.;

Д.А. Чистяков, канд. техн. наук, доц.

© Северо-Западный государственный заочный технический университет, 2008

© Родос Л.Я., Чистяков Д.А., 2008

# 1. Информация о дисциплине

## 1.1. Предисловие

Электродинамика и распространение радиоволн (ЭД и РРВ) относится к дисциплинам общепрофессионального цикла. Ее объем по государственному образовательному стандарту (ГОСу) составляет 170 часов. Она включает в себя две взаимосвязанные части: часть 1 - собственно электродинамику (теоретическую электродинамику) и часть 2 - распространение радиоволн (прикладную электродинамику). Данная дисциплина является базовой для современной радиотехники.

*Целью изучения дисциплины* является приобретение студентами теоретических знаний и навыков решения задач в области теории электромагнитного поля, особенностей взаимодействия электромагнитных волн с различными физическими средами, распространения радиоволн вдоль направляющих систем и на естественных трассах.

*Задачи изучения дисциплины* – усвоение основных положений электродинамики и особенностей распространения радиоволн.

В результате изучения дисциплины студент должен овладеть знаниями по дисциплине, формируемыми на нескольких уровнях:

### *Иметь представление:*

о философской трактовке понятия «электромагнитное поле», об истории развития учения об электромагнетизме, о взаимосвязи электрических, магнитных и оптических явлений, о векторном характере электромагнитных и оптических полей, о диапазонах радиоволн, использующихся в технике, основных особенностях распространения радиоволн на естественных трассах.

### *Знать:*

уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной формах, физический смысл всех слагаемых, входящих в эти уравнения; механизмы влияния Земли и атмосферы Земли на распространение радиоволн различных диапазонов.

### ***Уметь:***

преобразовывать уравнения Максвелла в уравнения электро- и магнитостатики, стационарных электрических и магнитных полей, в волновые уравнения для векторов электромагнитного поля, векторного и скалярного потенциалов; формулировать задачу (выбрать модель) для расчета параметров конкретной радиолинии.

### ***Получить навыки:***

решения задач электродинамики методами: разделения переменных, запаздывающих потенциалов, скалярного и векторного интегралов Кирхгофа; выбора типа, размеров и расчета параметров направляющих систем (линий передачи электромагнитной энергии); расчета характеристик излучения элементарных излучателей и реальных антенн; выбора модели и определения характера и степени влияния трассы распространения радиоволн на характеристики конкретной радиотехнической системы.

Изучение дисциплины «Электродинамика и распространение радиоволн» требует освоения ряда предшествующих дисциплин. К ним относятся: математика (ряды, дифференциальное и интегральное исчисление, векторная теория поля, решение дифференциальных уравнений); физика (электричество и магнетизм, электродинамика); информатика (методы алгоритмизации, численные методы решения). В свою очередь, курс ЭД и РРВ лежит в основе всех дисциплин, определяющих профессиональную подготовку специалиста в области радиотехники: основы теории цепей, радиотехнические цепи и сигналы, устройства СВЧ и антенны, устройства приема и обработки сигналов, устройства генерирования и формирования сигналов, радиотехнические системы и др.

Содержание, объем и порядок изучения материалов курса «Электродинамика и распространение радиоволн» в соответствии с требованиями ГОСа изложены в «Рабочей программе», представленной в рубрике «Информационные ресурсы». Там же представлен «Тематический план», содержащий информацию о видах отчетности по темам.

## **1.2. Содержание дисциплины и виды учебной работы**

### **1.2.1. Содержание дисциплины**

В соответствии с ГОСом в курсе «Электродинамика и распространение радиоволн» должны изучаться следующие дидактические единицы:  
интегральные и дифференциальные уравнения электромагнетизма; полная система уравнений Максвелла, граничные условия; энергия электромагнитного поля; теорема Умова-Пойнтинга; граничные задачи электродинамики; аналитические и численные методы решения граничных задач; электромагнитные волны в различных средах; электродинамические потенциалы; электромагнитные волны в направляющих системах; электромагнитные колебания в объемных резонаторах; возбуждение электромагнитных полей заданными источниками; излучение электромагнитных волн в свободное пространство; теорема запаздывающих потенциалов; распространение электромагнитных волн вблизи поверхности Земли; тропосферное распространение радиоволн; распространение радиоволн в условиях пересеченной местности и при наличии препятствий; модели и методы расчета радиотрасс.

### **1.2.2. Объем дисциплины и виды учебной работы**

Вид учебной работы	Всего часов		
	Форма обучения		
	Очная	Очно-заочная	Заочная
Общая трудоемкость дисциплины (ОТД)	170		
Работа под руководством преподавателя (РпРП)	102	102	102
В том числе аудиторные занятия:			
Лекции	70	16	8
Практические занятия (ПЗ)	8	-	-
Лабораторные работы (ЛР)	24	24	12
Количество часов работы с использованием ДОТ	-	62	82
Самостоятельная работа студента	68	68	68

Промежуточный контроль, количество	6	6	6
Контрольная работа	-	2	2
Зачет	1	1	1
Вид итогового контроля (экзамен), количество	2	2	2

### **1.2.3. Перечень видов учебной работы студента, текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации**

- две контрольные работы (для очно-заочной и заочной форм обучения);
- тесты (тренировочные по темам, рубежные по разделам дисциплины, вопросы для самопроверки и т.п.);
- один зачет (по лабораторным работам части 1- электродинамика);
- два экзамена.

## **2. Рабочие учебные материалы**

### **2.1. Рабочая программа (170 час.)**

#### **Часть 1 - электродинамика**

#### **2.1.1. Раздел 1. Интегральные и дифференциальные уравнения электромагнетизма**

##### **Основные понятия и определения (4 час.)**

[ 1 ], с. 3-10

Основные понятия и определения, материальность электромагнитного поля, векторы электромагнитного поля, классификация сред в электродинамике.

##### **Уравнения Максвелла - фундаментальные уравнения электродинамики (12 час.)**

[ 1 ], с. 10 - 15

Уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной формах и их физический смысл. Уравнение непрерывности электрического тока. Сторонние электрические и магнитные токи и заряды. Полная система уравнений ЭМП в симметричной и несимметричной формах. Уравнения Максвелла при гармонич-

ческой зависимости электромагнитных процессов от времени. Комплексная диэлектрическая проницаемость сред. Принцип перестановочной двойственности уравнений Максвелла.

### **Энергетические характеристики ЭМП (6 час.)**

[ 1 ], с. 15 - 17

Баланс энергии в ЭМП: локализация, движение и превращения энергии. Энергетические характеристики при гармонической зависимости электромагнитных процессов от времени.

### **Электромагнитные волны - форма существования ЭМП (6 час.)**

[ 1 ], с. 17 - 20

Волновые уравнения для векторов ЭМП. Электродинамические потенциалы. Волновые уравнения для электродинамических потенциалов. Волновые уравнения в комплексной форме.

### **Частные виды уравнений ЭМП (4 час.)**

[ 3 ], с. 72 - 105

Электростатическое поле: система зарядов, диполь, емкость, проводники и диэлектрики в электростатическом поле. Стационарное поле: система токов, магнитный диполь, индуктивность. Квазистационарное поле: от уравнений Максвелла к теории цепей.

## **2.1. 2. Раздел 2. Граничные задачи электродинамики**

### **Основные методы решения задач электродинамики (8 час.)**

[ 1 ], с. 21 -27

Внутренние и внешние задачи электродинамики. Краевые условия и условие излучения. Единственность решения задач электродинамики. Принцип суперпозиции решений, теорема взаимности, теорема эквивалентности. Строгие методы решения: запаздывающих потенциалов, разделения переменных, Кирхгофа. Приближенные методы решения: геометрической и волновой оптики, краевых волн, геометрической теории дифракции, моделирования.

## **Плоские электромагнитные волны (ЭМВ) (10 час.)**

[ 1 ], с. 27 - 42

Общие свойства волновых процессов. Плоские однородные электромагнитные волны в однородной безграничной изотропной среде. Волны в диэлектрике, полупроводнике и проводнике.

### **Сферические ЭМВ в безграничных однородных средах. Излучение ЭМВ (12 час.)**

[ 1 ], с. 42 - 48

Виды элементарных излучателей. Излучение системы заданных токов. Элементарный электрический излучатель: составляющие векторов ЭМП, функция направленности, мощность и сопротивление излучения.

Элементарный магнитный излучатель.

Элемент Гюйгенса.

### **Плоские ЭМВ в неоднородной среде (10 час.)**

[ 3 ], с. 207 - 219

Электромагнитные волны и оптические лучи. Граничные условия для векторов электромагнитного поля. Отражение и преломление электромагнитных волн на плоской границе раздела сред. Законы Снеллиуса и формулы Френеля. Понятия углов Брюстера, полного внутреннего отражения, поверхностного эффекта.

#### **2.1.3. Раздел 3. ЭМВ в направляющих системах. Электромагнитные колебания в объемных резонаторах.**

##### **Направляемые ЭМВ и направляющие системы.**

###### **Волноводы (16 час.)**

[ 1 ], с. 49 - 85

Общие сведения о направляющих системах и направляемых волнах. Полые металлические волноводы: прямоугольный, круглый. Структура электромагнитного поля, основные типы волн, фазовая и групповая скорости, длина волны в волноводе, характеристическое сопротивление, затухание электромаг-

нитных волн, возбуждение и связь волноводов, выбор размеров волновода для работы на заданном типе волн.

### **Коаксиальные и двухпроводные линии передачи (4 час.)**

[ 3 ], с. 224 - 229

Особенности волн типа Т и основные параметры Т волны в коаксиальной и двухпроводной линии передачи. Фазовая постоянная, фазовая скорость, групповая скорость, длина волны в линии, волновое сопротивление. Диапазон одномодовой работы коаксиальной линии.

### **Объемные резонаторы (8 час.)**

[ 3 ], с. 277 - 298

Отрезок направляющей структуры как резонатор. Общая теория объемных резонаторов на основе прямоугольного, цилиндрического и коаксиального волноводов. Собственная частота и добротность резонаторов. Возбуждение резонаторов.

## **Часть 2 – распространение радиоволн**

### **2.1.4. Раздел 4. Распространение ЭМВ вблизи поверхности Земли.**

#### **Влияние препятствий.**

#### **Основные понятия и определения (4 час.)**

[ 2 ], с. 4 - 7

Основные понятия и определения в теории РРВ. Роль и место вопросов распространения радиоволн в подготовке радиоинженеров. История развития теории РРВ. Классификация радиоволн по диапазонам частот и способам распространения на естественных трассах.

#### **Распространение радиоволн в свободном пространстве (10 час.)**

[ 2 ], с. 7 - 16

Электромагнитное поле изотропного и направленного излучателей в свободном пространстве. Уравнения идеальной радиосвязи для излучателей

различного типа. Принцип Гюйгенса-Френеля. Зоны Френеля в свободном пространстве. Существенная и минимальная области пространства при распространении радиоволн. Потери передачи при распространении радиоволн в свободном пространстве.

### **Влияние поверхности Земли на распространение радиоволн (18 час.)**

[ 2 ], с. 17 -41

Электрические параметры земной поверхности. Постановка и общее решение задачи дифракции радиоволн вокруг однородной сферической земной поверхности. Анализ общего решения задачи: влияние электрических параметров поверхности Земли и расстояния между корреспондирующими пунктами на величину и поведение множителя ослабления в пространстве. Расстояние прямой видимости и расчёт множителя ослабления в зоне прямой видимости. Интерференционные формулы. Пределы применимости интерференционных формул. Расчёт множителя ослабления в зонах тени и полутени. Отражение радиоволн от поверхности Земли, существенная и минимальная области отражающей поверхности. Учёт влияния кривизны земной поверхности при отражении радиоволн. Влияние неоднородности электрических параметров земной поверхности на распространение радиоволн вдоль неё. Влияние неровностей поверхности Земли на распространение радиоволн. Критерий Релея. Общие сведения о распространении радиоволн вблизи статистически неровных поверхностей.

### **2.1.5. Раздел 5. Влияние атмосферы Земли на распространение радиоволн.**

#### **Влияние тропосферы Земли на распространение радиоволн (10 час.)**

[ 2 ], с. 41 - 60

Состав и строение атмосферы Земли. Электромагнитные параметры тропосферы, стратосферы и ионосферы. Рефракция радиоволн в тропосфере и ионосфере. Уравнение траектории волны и радиус кривизны луча. Виды рефракции радиоволн в тропосфере. Эквивалентный радиус Земли. Процесс образования и параметры тропосферных волноводов.

## **Влияние ионосферы Земли на распространение радиоволн (8 час.)**

[2], с. 61 - 70

Траектория радиоволн в ионосфере. Отражение радиоволн от ионосферы. Критическая и максимальная частоты. Фазовая и групповая скорости распространения радиоволн в ионосфере. Влияние магнитного поля Земли на распространение радиоволн в ионосфере. Рассеяние и поглощение радиоволн в тропосфере и ионосфере. Методы экспериментального исследования тропосферы и ионосферы.

### **2.1.6. Раздел 6. Модели и методы расчета радиотрасс.**

#### **Радиолинии различного назначения. Диапазоны применяемых частот (8 час.)**

[2], с. 70 - 76

Линии радиовещания, телевидения, радиосвязи, радиолокации, радионавигации, радиоуправления и телеметрии. Назначение радиолиний, диапазоны применяемых частот и особенности распространения радиоволн этих диапазонов на трассе радиолинии.

#### **Методы расчета различных радиолиний**

[2], с. 76 - 90

Методики расчёта радиолиний различного назначения и различных диапазонов радиоволн.

## 2.2 . Тематический план дисциплины

### 2.2.1. Тематический план дисциплины для студентов очной формы обучения

№ п/п	Наименование разделов и тем	Количество часов по очной форме обучения	Виды занятий (часы)							Виды контроля				
			лекции		ПЗ (С)		ЛР		Самостоятельная работа	Тесты	Контрольные работы	Рефераты	ЛР	Курсовая работа
			аудит.	ДОГ	аудит.	ДОГ	аудит.	ДОГ						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	<b>ВСЕГО</b>	<b>170</b>	<b>70</b>		<b>8</b>		<b>24</b>	-	<b>68</b>					
1	<b>Раздел 1. Интегральные и дифференциальные уравнения электромагнетизма</b>	<b>32</b>	<b>16</b>	-	-	-	-	-	<b>16</b>	<b>№1</b>				
2	1.1 Основные понятия и определения	4	2	-	-	-	-	-	2					
3	1.2 Уравнения Максвелла – фундаментальные уравнения электродинамики	12	8	-	-	-	-	-	4					
4	1.3 Энергетические характеристики электромагнитного поля (ЭМП)	6	2	-	-	-	-	-	4					
5	1.4 Электромагнитные волны – форма существования ЭМП	6	4	-	-	-	-	-	2					
6	1.5 Частные виды уравнений ЭМП	4	-	-	-	-	-	-	4					
7	<b>Раздел 2. Граничные задачи электродинамики</b>	<b>40</b>	<b>18</b>	-	<b>2</b>		<b>8</b>	-	<b>12</b>	<b>№2</b>				
8	2.1 Основные методы решения задач электродинамики	8	6	-	-	-	-	-	2					
9	2.2 Плоские электромагнитные волны (ЭМВ) в однородной среде	10	4	-	-	-	4	-	2				№1	
10	2.3 Сферические ЭМВ в безграничных средах. Излучение ЭМВ.	12	6	-	2	-	-	-	4		№1			
11	2.4 Плоские ЭМВ в неоднородной среде	10	2	-	-	-	4	-	4				№5	
12	<b>Раздел 3. ЭМВ в направляющих системах. Электромагнитные колебания в объемных резонаторах</b>	<b>28</b>	<b>14</b>	-	<b>2</b>	-	<b>8</b>	-	<b>4</b>	<b>№3</b>				
13	3.1 Направляемые ЭМВ и направляющие системы. Волноводы	16	8	-	2	-	4	-	2		№1		№2	
14	3.2 Коаксиальные и двухпроводные линии передачи	4	2	-	-	-	-	-	2					
15	3.3 Объемные резонаторы	8	4	-	-	-	4	-	-				№3	
16	<b>Раздел 4. Распространение ЭМВ вблизи поверхности Земли. Влияние препятствий.</b>	<b>32</b>	<b>16</b>	-	<b>4</b>	-	<b>8</b>	-	<b>4</b>	<b>№4</b>				
17	4.1 Основные понятия и определения	4	2	-	-	-	-	-	2					

18	4.2 Распространение радиоволн в свободном пространстве	10	2	-	2	-	4		2		№2		№4
19	4.3 Влияние поверхности Земли на распространение радиоволн	18	12	-	2	-	4	-	-		№2		№6
20	<b>Раздел 5. Влияние атмосферы Земли на распространение радиоволн</b>	<b>18</b>	<b>4</b>	-	-	-	-	-	<b>14</b>	<b>№5</b>			
21	5.1 Влияние тропосферы Земли на распространение радиоволн	10	2	-	-	-	-	-	8				
22	5.2 Влияние ионосферы Земли на распространение радиоволн	8	2	-	-	-	-	-	6				
23	<b>Раздел 6. Модели и методы расчета радиотрасс</b>	<b>20</b>	<b>2</b>	-	-	-	-	-	<b>18</b>	<b>№6</b>			
24	6.1 Радиолинии различного назначения. Диапазоны применяемых частот	8	-	-	-	-	-	-	8				
25	6.2 Методы расчета различных радиолиний	12	2	-	-	-	-	-	10				

## 2.2.2. Тематический план дисциплины для студентов очно-заочной формы обучения

№ п/п	Наименование разделов и тем	Количество часов по дневной форме	Виды занятий (часы)						Виды контроля					
			Лекции		ПЗ		ЛР		Самост. работа	Тесты	Контр. работы	ПЗ	ЛР	Курс. работы
			Аудиторн.	ДОТ	Аудиторн.	ДОТ	Аудиторн.	ДОТ						
	<b>Всего</b>	<b>170</b>	<b>16</b>	<b>54</b>	-	<b>8</b>	<b>24</b>		<b>68</b>					
1	<b>Раздел 1. Интегральные и дифференциальные уравнения электромагнетизма</b>	<b>32</b>	<b>4</b>	<b>12</b>		<b>2</b>			<b>14</b>	<b>№1</b>				
2	1.1 Основные понятия и определения	4		2					2					
3	1.2 Уравнения Максвелла - фундаментальные уравнения электродинамики	12	2	4		2			4					
4	1.3 Энергетические характеристики электромагнитного поля (ЭМП)	6	2	2					2					
5	1.4 Электромагнитные волны -форма существования ЭМП	6		2					4					
6	1.5 Частные виды уравнений ЭМП	4		2					2					
7	<b>Раздел 2. Граничные задачи электродинамики</b>	<b>40</b>	<b>4</b>	<b>12</b>		<b>2</b>	<b>8</b>		<b>14</b>	<b>№2</b>				
8	2.1 Основные методы решения задач электродинамики	8		8										
9	2.2 Плоские электромагнитные волны (ЭМВ) в однородной среде	10		2			4		4				№1	
10	2.3 Сферические ЭМВ в безграничных однородных средах. Излучение ЭМВ	12	2	2		2			6	№1				
11	2.4 Плоские ЭМВ в неоднородной среде	10	2				4		4				№5	

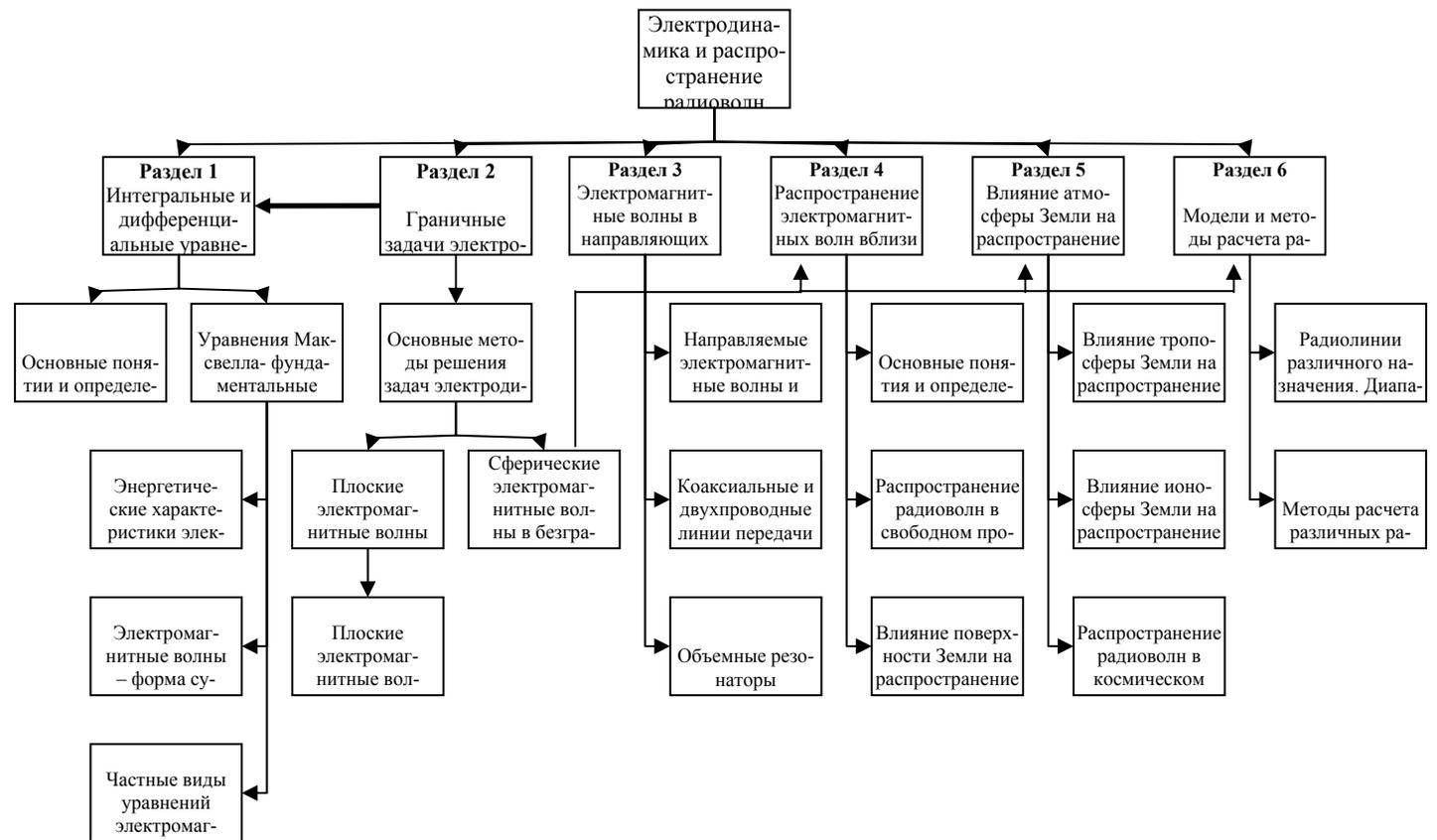
12	<b>Раздел 3. ЭМВ в направляющих системах. Электромагнитные колебания в объемных резонаторах</b>	28	2	6		2	8		10	№ 3				
13	3.1 Направляемые электромагнитные волны и направляющие системы. Волноводы.	16	2	4		2	4		4	№ 1			№2	
14	3.2 Коаксиальные и двухпроводные линии передачи	4		2					2					
15	3.3 Объемные резонаторы	8					4		4				№3	
16	<b>Раздел 4. Распространение электромагнитных волн вблизи поверхности Земли. Влияние препятствий.</b>	32	4	4		2	8		14	№ 4				
17	4.1 Основные понятия и определения	4		2					2					
18	4.2 Распространение радиоволн в свободном пространстве	10	2				4		4	№ 2			№4	
19	4.3 Влияние поверхности Земли на распространение радиоволн	18	2	2		2	4		8	№ 2			№6	
20	<b>Раздел 5. Влияние атмосферы Земли на распространение радиоволн</b>	18	2	8					8	№ 5				
21	5.1 Влияние тропосферы Земли на распространение радиоволн	10		4					6					
22	5.2 Влияние ионосферы Земли на распространение радиоволн	8	2	4					2					
23	<b>Раздел 6. Модели и методы расчета радиотрасс</b>	20		12					8	№ 6				
24	6.1 Радиолинии различного назначения. Диапазоны применяемых частот	8		4					4					
25	6.2 Методы расчета различных радиолиний	12		8					4					

### 2.2.3. Тематический план дисциплины для студентов заочной формы обучения

№ п/п	Наименование разделов и тем	Количество часов по очной форме обучения	Виды занятий (часы)							Виды контроля				
			лекции		ПЗ (С)		ЛР		Самостоятельная работа	Тесты	Контрольные работы	Рефераты	ЛР	Курсовая работа
			аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	<b>ВСЕГО</b>	<b>170</b>	<b>8</b>	<b>70</b>		<b>12</b>	<b>12</b>	-	<b>68</b>					
1	<b>Раздел 1. Интегральные и дифференциальные уравнения электромагнетизма</b>	<b>32</b>	<b>4</b>	<b>12</b>	-	-	-	-	<b>16</b>	<b>№1</b>				
2	1.1 Основные понятия и определения	4	-	2	-	-	-	-	2					
3	1.2 Уравнения Максвелла – фундаментальные уравнения электродинамики	12	2	6	-	-	-	-	4					
4	1.3 Энергетические характеристики электромагнитного поля (ЭМП)	6	-	2	-	-	-	-	4					

5	1.4 Электромагнитные волны – форма существования ЭМП	6	2	2	-	-	-	-	2					
6	1.5 Частные виды уравнений ЭМП	4	-	-	-		-	-	4					
7	<b>Раздел 2. Граничные задачи электродинамики</b>	<b>40</b>	-	<b>20</b>			<b>2</b>	<b>4</b>	-	<b>14</b>	<b>№2</b>			
8	2.1 Основные методы решения задач электродинамики	8		6	-	-	-	-	2					
9	2.2 Плоские электромагнитные волны (ЭМВ) в однородной среде	10	-	4	-	-	2	-	4				№1	
10	2.3 Сферические ЭМВ в безграничных средах. Излучение ЭМВ.	12	-	6	-	2		-	4		№1			
11	2.4 Плоские ЭМВ в неоднородной среде	10	-	4	-	-	2	-	4				№5	
12	<b>Раздел 3. ЭМВ в направляющих системах. Электромагнитные колебания в объемных резонаторах</b>	<b>28</b>	-	<b>14</b>	-	<b>4</b>	<b>4</b>	-	<b>6</b>	<b>№3</b>				
13	3.1 Направляемые ЭМВ и направляющие системы. Волноводы	16	-	8	-	4	2	-	2		№1		№2	
14	3.2 Коаксиальные и двухпроводные линии передачи	4	-	2	-	-	-		2					
15	3.3 Объемные резонаторы	8	-	4	-	-	2		2				№3	
16	<b>Раздел 4. Распространение ЭМВ вблизи поверхности Земли. Влияние препятствий.</b>	<b>32</b>	-	<b>10</b>	-	<b>6</b>	<b>4</b>	-	<b>12</b>	<b>№4</b>				
17	4.1 Основные понятия и определения	4	-	2	-	-	-	-	2					
18	4.2 Распространение радиоволн в свободном пространстве	10	-	2	-	2	2		4		№2		№4	
19	4.3 Влияние поверхности Земли на распространение радиоволн	18	-	6	-	4	2	-	6		№2		№6	
20	<b>Раздел 5. Влияние атмосферы Земли на распространение радиоволн</b>	<b>18</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	-	-	-	-	<b>10</b>	<b>№5</b>				
21	5.1 Влияние тропосферы Земли на распространение радиоволн	10	2	2	-	-	-	-	6					
22	5.2 Влияние ионосферы Земли на распространение радиоволн	8	-	4	-	-	-	-	4					
23	<b>Раздел 6. Модели и методы расчета радиотрасс</b>	<b>20</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	-	-	-	-	<b>10</b>	<b>№6</b>				
24	6.1 Радиолинии различного назначения. Диапазоны применяемых частот	8	-	4	-	-	-	-	4					
25	6.2 Методы расчета различных радиолиний	12	2	4	-	-	-	-	6					

### 2.3. Структурно-логическая схема дисциплины



## 2.4. Временной график изучения дисциплины

(для студентов, занимающихся с применением ДОТ)

№	Название раздела (темы)	Продолжительность изучения раздела (темы)
1	Раздел 1. Интегральные и дифференциальные уравнения электродинамики	7 дн.
2	Раздел 2. Граничные задачи электродинамики	9 дн.
3	Раздел 3. Электромагнитные волны в направляющих системах. Электромагнитные колебания в объемных резонаторах	7 дн.
4	Раздел 4. Распространение электромагнитных волн вблизи поверхности Земли	7 дн.
5	Раздел 5. Влияние атмосферы Земли на распространение радиоволн	4 дн.
6	Раздел 6. Модели и методы расчета радиотрасс	4 дн.
7	Контрольная работа № 1	2 дн.
8	Контрольная работа № 2	2 дн.
	ИТОГО	42 дн.

## 2.5. Практический блок

### 2.5.1. Практические занятия

#### Практические занятия (очная форма обучения)

Номер и наименование темы	Наименование тем практических занятий	Количество часов
Тема 2.3 Сферические ЭМВ в безграничных средах. Излучение ЭМВ	<i>Решение задач на излучение ЭМВ элементарными электрическим и магнитным диполями</i>	2
Тема 3.1 Направляемые ЭМВ и направляющие системы. Волноводы	<i>Определение размеров волноводов и характеристик ЭМП в прямоугольном и круглом волноводах</i>	2
Тема 4.2 Распространение радиоволн в свободном пространстве	<i>Определение параметров линий радиосвязи в свободном (космическом) пространстве</i>	2
Тема 4.3 Влияние по-	<i>Расчет напряженности ЭМП на ра-</i>	2

верхности Земли на рас- пространение радиоволн	<i>диолиниях, проходящих вблизи поверх- ности Земли</i>	
---	---	--

**Практические занятия (заочная и очно-заочная формы обучения).**

Практические занятия для студентов указанных форм обучения учебными рабочими планами не предусмотрены.

**2.5.2. Лабораторные работы**

**Лабораторные работы (очная форма обучения)**

Номер и наименование раздела (темы)	Наименование лабораторной работы	Количество часов
Раздел 2. Граничные задачи электродинамики Тема 2.2. Плоские электромагнитные волны Тема 2.4. Плоские ЭМВ в неоднородной среде	Исследование поляризации электромагнитного поля  Исследование отражения и преломления плоских ЭМВ на плоской границе раздела двух однородных диэлектрических сред	4  4
Раздел 3. ЭМВ в направляющих системах. Электромагнитные колебания в объемных резонаторах Тема 3.1. Направляемые ЭМВ и направляющие системы Тема 3.3. Объемные резонаторы	Исследование основной волны в полном прямоугольном металлическом волноводе  Исследование электромагнитного поля в цилиндрическом объемном резонаторе	4  4

Раздел 4. Распространение ЭМВ вблизи поверхности Земли		
Тема 4.2. Распространение радиоволн в свободном пространстве	Исследование области пространства, оказывающей существенное влияние на распространение радиоволн в однородной среде	4
Тема 4.3. Влияние поверхности Земли на распространение радиоволн	Исследование влияния поверхности Земли на распространение радиоволн	4

### Лабораторные работы (очно-заочная форма обучения)

Номер и наименование раздела (темы)	Наименование лабораторной работы	Количество часов
Раздел 2. Граничные задачи электродинамики		
Тема 2.2. Плоские электромагнитные волны	Исследование поляризации электромагнитного поля	4
Тема 2.4. Плоские ЭМВ в неоднородной среде	Исследование отражения и преломления плоских ЭМВ на плоской границе раздела двух однородных диэлектрических сред	4
Раздел 3. ЭМВ в направляющих системах. Электромагнитные колебания в объемных резонаторах		
Тема 3.1. Направляемые ЭМВ и направляющие системы	Исследование основной волны в полном прямоугольном металлическом волноводе	4
Тема 3.3. Объемные резонаторы	Исследование электромагнитного поля в цилиндрическом объемном резонаторе	4

Раздел 4. Распространение ЭМВ вблизи поверхности Земли Тема 4.2. Распространение радиоволн в свободном пространстве	Исследование области пространства, оказывающей существенное влияние на распространение радиоволн в однородной среде	4
Тема 4.3. Влияние поверхности Земли на распространение радиоволн	Исследование влияния поверхности Земли на распространение радиоволн	4

### Лабораторные работы (заочная форма обучения)

Номер и наименование раздела (темы)	Наименование лабораторной работы	Количество часов
Раздел 2. Граничные задачи электродинамики Тема 2.2. Плоские электромагнитные волны	Исследование поляризации электромагнитного поля	2
Тема 2.4. Плоские ЭМВ в неоднородной среде	Исследование отражения и преломления плоских ЭМВ на плоской границе раздела двух однородных диэлектрических сред	2
Раздел 3. ЭМВ в направляющих системах. Электромагнитные колебания в объемных резонаторах Тема 3.1. Направляемые ЭМВ и направляющие системы	Исследование основной волны в полном прямоугольном металлическом волноводе	2
Тема 3.3. Объемные резонаторы	Исследование электромагнитного поля в цилиндрическом объемном резонаторе	2

Раздел 4. Распространение ЭМВ вблизи поверхности Земли		
Тема 4.2. Распространение радиоволн в свободном пространстве	Исследование области пространства, оказывающей существенное влияние на распространение радиоволн в однородной среде	2
Тема 4.3. Влияние поверхности Земли на распространение радиоволн	Исследование влияния поверхности Земли на распространение радиоволн	2

## 2.6. Балльно-рейтинговая система оценки знаний при использовании ДОТ

Дисциплина Электродинамика и распространение радиоволн, как указывалось выше, состоит из двух частей. Изучение первой части курса (электродинамики) осуществляется в пятом семестре и заканчивается сдачей экзамена.

Первая часть курса содержит три раздела (двенадцать тем), при изучении которых необходимо выполнить первую контрольную работу, состоящую из двух задач. Каждая тема в опорном конспекте заканчивается перечнем вопросов для самопроверки, которые следует рассматривать в качестве тренировочных тестов с открытым заданием. После изучения каждой темы необходимо ответить на вопросы тренировочных тестов текущего (промежуточного) контроля, содержащего пять вопросов. Изучение каждого раздела заканчивается ответом на вопросы теста рубежного контроля, содержащего десять вопросов. Номера соответствующих тестов приведены в тематическом плане.

Определение рейтинг-баллов производится следующим образом:

- за правильный ответ на вопрос теста рубежного контроля - 2 балла;
- за правильно решенную задачу - 20 баллов.

При успешной работе с материалами первой части курса студент может получить  $2 \times 10 \times 3 + 20 \times 2 = 100$  баллов.

Преодоление порога в 70 баллов, а также выполнение цикла лабораторных работ по разделам 2 и 3 в период экзаменационной сессии и получение за-

чета по лабораторным работам, обеспечивает допуск к экзамену.

Изучение второй части курса осуществляется в шестом семестре и заканчивается экзаменом. Вторая часть курса состоит из трех разделов (семи тем), при изучении которых необходимо выполнить вторую контрольную работу, состоящую из двух задач. Каждая тема в опорном конспекте заканчивается вопросами для самопроверки, которые следует рассматривать в качестве тренировочных тестов с открытым заданием. После изучения каждой темы необходимо ответить на вопросы тренировочного теста текущего (промежуточного) контроля, состоящего из пяти вопросов. Изучение каждого раздела заканчивается ответом на вопросы теста рубежного контроля, содержащего десять вопросов. Номера соответствующих тестов приведены в тематическом плане.

Определение рейтинг-баллов при изучении второй части курса производится так же, как и первой части.

При успешной работе с материалами второй части курса студент может получить  $2 \times 10 \times 3 + 20 \times 2 = 100$  баллов.

Преодоление порога в 75 баллов и выполнение цикла лабораторных работ в период экзаменационной сессии обеспечивает допуск к экзамену.

### **3. Информационные ресурсы дисциплины**

#### **3.1. Библиографический список**

##### ***Основной:***

1. Калашников, В.С. Электродинамика и распространение радиоволн (электродинамика): письм. лекции / В.С. Калашников, Л.Я. Родос. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2004.

2. Родос, Л.Я. Электродинамика и распространение радиоволн (распространение радиоволн): учеб.- метод. комплекс: учеб.пособие / Л.Я. Родос. - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007.

3. Красюк, Н.П. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие для вузов/ Н.П. Красюк, Н.Д. Дымович.- М.: Высш. шк., 1974.

##### ***Дополнительный:***

4. Петров, Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. для вузов/ Б.М. Петров. – 2-е изд., испр. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003.
5. Красюк, Н.П. Распространение УКВ в неоднородной тропосфере: учеб. пособие / Н.П. Красюк, Л.Я. Родос. – Л.: СЗПИ, 1984.
6. Чистяков, Д. А. Законы и уравнения электродинамики как следствия уравнений Максвелла: конспект лекций/ Д.А. Чистяков. – СПб.: СЗПИ, 1994.
7. Чистяков, Д.А. Основы электродинамики в задачах с решениями: писм. лекции/ Д.А. Чистяков. – СПб.: СЗПИ, 1994.
8. Чистяков, Д.А. Уравнения Максвелла – физические аксиомы электродинамики: письм. лекции / Д.А. Чистяков. – СПб.: СЗПИ, 1993.

*В электронной библиотеке СЗТУ по адресу <http://www.elib.nwpi.ru> имеются источники из библиографического списка под номерами: 1;2;5.*

### **3.2. Опорный конспект (сценарий учебного процесса)**

Дисциплина Электродинамика и распространение радиоволн, как указывалось выше, является фундаментальной дисциплиной и целиком базируется на курсах физики и высшей математики.

В связи с этим, приступая к ее изучению, необходимо восстановить в памяти основные сведения из второй части курса общей физики (электричество и магнетизм) и следующих разделов высшей математики: уравнения математической физики, векторный анализ, теория поля.

Основной целью дисциплины является изучение уравнений Максвелла, их физического смысла и применение этих уравнений для решения прикладных задач радиофизики и радиотехники.

Методика и последовательность изучения дисциплины соответствуют перечню тем тематического плана. Материал каждой темы насыщен математическими соотношениями, физическая интерпретация которых зачастую достаточно сложна, поэтому изучение материала требует серьезной, вдумчивой работы.

### **3.2.1. Основные понятия и определения в электродинамике**

Основные понятия и определения изложены в [1] на страницах 3-10.

При изучении данного раздела необходимо уяснить назначение дисциплины при подготовке радиоинженеров, место и задачи ее в системе современных представлений естествознания, обратив особое внимание на материальность электромагнитного поля.

Необходимо усвоить, что электромагнитное поле во всех своих проявлениях полностью характеризуется двумя основными и четырьмя дополнительными векторами. Электромагнитное поле существует и рассматривается в различных средах, которые классифицируются по характеру зависимости их электромагнитных параметров от времени, пространственных координат, величины и направления векторов электромагнитного поля, существующего в данной среде. Все математические соотношения данного курса записываются в единицах "СИ".

#### **Вопросы для самопроверки**

1. Каковы основные особенности электромагнитного поля, подтверждающие его материальность?
2. В чем заключается физический смысл векторов, характеризующих электромагнитное поле?
3. Какой вид имеют материальные уравнения для векторов электромагнитного поля?
4. Какие классификации сред, применяются в электродинамике?

### **3.2.2. Уравнения Максвелла - фундаментальные уравнения электродинамики**

Содержание данного раздела представлено в [1] на страницах 10 -15.

Необходимо обратить внимание на то, что уравнения Максвелла являются результатом обобщения большого числа физических законов, представляют собой фундаментальные зависимости макроскопической электродинамики, позволяющие получить все основные соотношения теории электромагнит-

ного поля. Следует уяснить, что источниками электромагнитного поля являются электрически заряженные частицы либо движущиеся, либо находящиеся в покое.

В практических приложениях часто используется гармоническая зависимость от времени величин, входящих в уравнения Максвелла, поэтому для их представления удобно применять символический метод.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Какие экспериментальные законы лежат в основе уравнений Максвелла?
2. В чем состоит физический смысл тока смещения?
3. Каков физический смысл уравнений Максвелла в интегральной и дифференциальной формах?
4. В чем заключается разница между симметричной и несимметричной формами записи уравнений Максвелла?

### **3.2.3. Энергетические характеристики ЭМП**

Содержание данного раздела изложено в [1] на страницах 15 -17.

Электромагнитное поле как вид материи обладает определенной энергией. Для него справедлив закон сохранения. Аналитическим представлением этого закона является уравнение баланса электромагнитной энергии - теорема Умова - Пойнтинга.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Какие энергетические составляющие могут входить в уравнение баланса энергии электромагнитного поля?
2. Запишите выражение для вектора Пойнтинга в случае гармонических во времени полей.

### **3.2.4. Электромагнитные волны - форма существования ЭМП**

Содержание данного раздела приведено в [1] на страницах 17 -20.

Из уравнений Максвелла следует, что электромагнитное поле может су-

уществовать в виде электромагнитных волн. Адекватными соотношениями, описывающими волновой характер электромагнитного поля, являются волновые уравнения - дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка, которые могут быть получены непосредственно из уравнений Максвелла - дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка. Для решения различного рода прикладных задач используются обычно волновые уравнения для векторов поля и волновые уравнения для электродинамических потенциалов. При гармонической зависимости электродинамических процессов от времени форма записи и решение волновых уравнений существенно упрощаются.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Какие виды волновых уравнений используются для решения задач электродинамики?
2. В чем заключается смысл калибровочного соотношения?
3. В чем состоит отличие уравнений Даламбера и Гельмгольца от обобщенного волнового уравнения?
4. Имеется ли разница между векторным потенциалом и вектором Герца в случае гармонического электромагнитного поля?

### **3.2.5. Частные виды уравнений ЭМП**

Содержание данного раздела приведено в [3] на страницах 72 -105.

Уравнения стационарных и статических полей получаются как частные случаи из уравнений электродинамики - уравнений Максвелла при условии, что источники электромагнитного поля либо стационарны (не зависят от времени), либо, кроме того, еще и неподвижны (статичны). Стационарные и статические поля материальны; для них выполняется закон сохранения и превращения энергии, но они не носят волнового характера и в уравнениях, описывающих их поведение, не содержится временной зависимости (например, уравнения Пуассона и Лапласа).

### **Вопросы для самопроверки**

1. При каких условиях система уравнений Максвелла распадается на системы уравнений электро- и магнитостатики?
2. В чем состоит отличие стационарных и статических полей?
3. Чем определяется величина энергии электростатического поля?
4. Запишите уравнения второго порядка в частных производных для статических и стационарных полей.
5. Какие методы используются для решения задач электростатики?

### **3.2.6. Основные методы решения задач электродинамики**

Содержание данного раздела изложено в [1] на страницах 21 – 27.

При освоении настоящего раздела необходимо изучить особенности формулировки и решения внутренних и внешних задач электродинамики, обратив особое внимание на формулировку условий единственности решения электродинамических задач для ограниченных и безграничных объемов пространства, основные принципы и теоремы, используемые при построении решений практических задач. Изучить строгие и приближенные методы решения, учитывая, что результаты решения любыми строгими методами совпадают, в то время как результаты решения задачи, полученные различными приближенными методами, отличаются друг от друга.

#### **Вопросы для самопроверки**

1. Как формулируются внутренние и внешние задачи электродинамики?
2. В чем состоит роль условия излучения при решении внешних задач?
3. Как формулируется теорема единственности решения задач электродинамики?
4. При каких условиях справедлив принцип суперпозиции решений?
5. Для каких сред выполняется теорема взаимности и в чем заключается ее сущность?
6. Какова роль теоремы эквивалентности для внешних задач электродинамики?
7. Что лежит в основе решения задач методом запаздывающих потен-

циалов?

8. При каких условиях метод Кирхгофа может рассматриваться как строгий метод решения?

9. Сформулируйте условия применимости методов геометрической и волновой оптики.

10. В чем состоит сущность методов краевых волн и геометрической теории дифракции?

11. В чем состоит сущность метода электродинамического моделирования?

### **3.2.7. Плоские электромагнитные волны (ЭМВ)**

Содержание раздела представлено в [1] на страницах 27 – 42.

В данном разделе необходимо обратить внимание на то, что для характеристики любого волнового процесса вводятся понятия фазового и амплитудного волновых фронтов. В общем случае фазовые фронты могут иметь произвольную форму, однако основными являются: плоская, цилиндрическая и сферическая. Для характеристики векторных волновых процессов кроме амплитуды, фазы и частоты колебаний, вводится понятие поляризации. Необходимо изучить все существующие разновидности поляризации электромагнитных волн. Здесь же следует рассмотреть решение уравнений Гельмгольца для векторов электромагнитного поля в виде плоских волн, обратив внимание на различные математические формы записи выражений, взаимную ориентацию векторов напряженностей электрического и магнитного полей и вектора Пойнтинга, а также на связь между ними и электромагнитными параметрами среды. Следует изучить особенности распространения плоской волны в диэлектрике, полупроводнике и проводнике, обратив внимание на специфику распространения плоской волны в средах с проводимостью (экспоненциальное убывание амплитуды, появление фазового сдвига и дисперсии).

#### **Вопросы для самопроверки**

1. В чем заключается отличие волновых процессов от колебательных процессов в радиотехнических цепях?

2. Какая дополнительная характеристика вводится для описания векторных волновых процессов?

3. Какие виды поляризации принято рассматривать в задачах электродинамики?

4. Каковы основные свойства плоской волны?

5. Какой характер носит волновое число в различных средах?

6. В чем заключаются особенности распространения плоской волны в средах с проводимостью?

7. Какова природа явления дисперсии при распространении плоской волны в полупроводящей среде?

8. К чему приводит нелинейность и анизотропия среды при распространении плоской волны?

### **3.2.8. Сферические ЭМВ в безграничных однородных средах. Излучение ЭМВ**

Содержание данного раздела приведено в [1] на страницах 42 – 48.

При изучении настоящего раздела необходимо уяснить постановку задачи об излучении электромагнитных волн, а также то, что излучение создается только электрическими зарядами, движущимися с ускорением. Необходимо усвоить цель введения понятия элементарного излучателя, виды моделей элементарных излучателей и методы расчета их характеристик. Следует обратить внимание на особенности распределения электромагнитного поля элементарного излучателя в пространстве в зависимости от расстояния и угловых координат, усвоить особенности поведения вектора Пойнтинга. Необходимо также знать основные технические характеристики излучателей, такие как диаграмма направленности, мощность и сопротивление излучения, коэффициент направленного действия.

#### **Вопросы для самопроверки**

1. Какова цель введения понятия элементарного излучателя?

2. Как формулируется задача излучения электромагнитных волн?
3. Какой метод решения используется для расчета излучения элементарного электрического диполя?
4. Назовите характерные зоны пространства и критерии разделения, в которых принято рассматривать поле излучения.
5. Охарактеризуйте энергетические свойства поля, излученного элементарным излучателем.
6. Какие характеристики свойственны элементарному излучателю как антенне?
7. Какие модели используются для описания элементарного магнитного излучателя?
8. Сравните излучающую способность элементарных электрического и магнитного излучателей.
9. Какой вид имеет диаграмма направленности элемента Гюйгенса?

### **3.2.9. Плоские ЭМВ в неоднородной среде**

Содержание данного раздела представлено в [3] на страницах 207 – 219.

При изучении настоящего раздела студент должен уяснить постановку задачи об отражении и преломлении плоской электромагнитной волны на плоской границе раздела сред и физику явлений, имеющих место на границе раздела. Необходимо знать методику получения соотношений для векторов электромагнитного поля на границе раздела, обратив внимание на области использования граничных условий. Следует также изучить содержание и смысл таких понятий как угол полного внутреннего отражения, угол Брюстера, поверхностный эффект.

#### **Вопросы для самопроверки**

1. В чем заключается физика отражения, и преломления плоской волны на границе раздела сред?
2. Как формулируется электродинамическая задача на отражение и пре-

ломление плоской волны на границе раздела сред?

3. В чем состоит смысл введения граничных условий?

4. Как определяется поляризация электромагнитной волны, падающей на границу раздела сред?

5. В чем заключается физический смысл явления полной поляризации?

6. Что понимается под толщиной скин-слоя?

7. Изобразите поведение модуля, и фазы коэффициента отражения при падении плоской волны на границу раздела в функции от угла падения.

### **3.2.10. Направляемые ЭМВ и направляющие системы. Волноводы**

Содержание данного раздела приведено в [1] на страницах 49 – 85.

В данном разделе следует изучить существующие виды направляющих систем, типы и основные особенности электромагнитных волн, распространяющихся в них, рассмотреть решение волнового уравнения для прямоугольного и круглого волноводов. Необходимо уяснить основные параметры, характеризующие работу волновода: критическая длина волны, длина волны в волноводе, фазовая и групповая скорости, характеристическое сопротивление волновода. Необходимо знать и уметь изобразить графически структуру основных типов колебаний в прямоугольном и круглом волноводе, а также уметь выбрать размеры волновода для работы на заданном типе колебаний. Следует также иметь представление о распределении токов на стенках волновода и системах возбуждения и связи волноводов.

#### **Вопросы для самопроверки**

1. Назовите существующие в настоящее время типы направляющих систем.

2. В чем заключается отличие электрических, магнитных и поперечных электромагнитных волн в линиях передачи?

3. Какие типы волн могут распространяться в волноводах, коаксиальных и проводных линиях передачи?

4. Сформулируйте постановку задачи о распространении электромаг-

нитных волн в волноводе.

5. Какие граничные условия используются при решении волнового уравнения в полом металлическом волноводе?

6. В каких пределах могут изменяться фазовая и групповая скорости электромагнитных волн в волноводе?

7. Какой тип колебаний принято называть основным?

8. Исходя из каких условий, производится выбор размеров поперечного сечения волновода?

9. Сформулируйте требования к устройствам возбуждения электромагнитных колебаний в волноводе.

### **3.2.11. Коаксиальные и двухпроводные линии передачи**

Содержание раздела представлено в [3] на страницах 224 – 229.

В данном разделе необходимо изучить основные понятия, относящиеся к поперечным электромагнитным волнам, обратить внимание на особенности распределения электромагнитной волны вдоль линии передачи и в ее поперечных сечениях. Следует также уметь записать выражения для основных параметров, характеризующих данные линии передачи: волнового сопротивления, погонной емкости и индуктивности, коэффициента ослабления, величины переносимой мощности.

#### **Вопросы для самопроверки**

1. Сформулируйте основные свойства поперечной волны в линиях передачи.

2. Изобразите картину силовых линий электромагнитной волны в плоскости поперечного сечения коаксиальной и двухпроводной линий передачи.

3. Запишите выражения для основных параметров рассматриваемых линий передачи.

### **3.2.12. Объемные резонаторы**

Содержание данного раздела представлено в [3] на страницах 277 – 298.

При изучении данного раздела необходимо уяснить назначение и конст-

руктивные особенности различных видов объемных резонаторов. Ознакомиться с методом решения волнового уравнения для объемного резонатора, построенного на базе прямоугольного волновода, типами и структурой простейших видов колебаний в нем, а также с методами расчета основных параметров резонатора. Следует знать основные типы колебаний в цилиндрических объемных резонаторах, способы определения собственной резонансной частоты, добротности и размеров резонатора, способы возбуждения.

#### **Вопросы для самопроверки**

1. Какие типы объемных резонаторов используются в технике сверхвысоких частот?
2. Какие типы колебаний могут существовать в объемных резонаторах?
3. Как определяется добротность объемного резонатора?
4. Из каких соображений определяются размеры объемных резонаторов, построенных на основе прямоугольного и круглого волноводов?
5. Какие системы возбуждения резонаторов используются на практике?

#### **3.2.13. Основные понятия и определения в теории РРВ**

Содержание данного раздела представлено в [2] на странице 4.

В данном разделе, необходимо обратить внимание на роль российских ученых в разработке теории и развитии техники систем радиовещания, радиосвязи, телевидения, радиолокации.

Следует помнить, что в настоящее время во всем мире принята десятичная система деления частотного диапазона волн на поддиапазоны. Необходимо иметь представление об особенностях распространения радиоволн этих поддиапазонов.

#### **Вопросы для самопроверки**

1. На какие поддиапазоны разделяют весь диапазон радиоволн?
2. Каковы особенности распространения радиоволн различных поддиапазонов?

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

Содержание данного раздела представлено в [2] на страницах 7-16.

В этом разделе следует обратить внимание на энергетические соотношения при распространении радиоволн ненаправленного и направленного излучателей в свободном пространстве. Необходимо уметь вывести и проанализировать уравнение идеальной радиосвязи; используя принцип Гюйгенса-Френеля, построить зоны Френеля и определить существенную и минимальную области пространства, оказывающие влияние на распространение радиоволн. Необходимо также обратить внимание на то, что даже при распространении радиоволн в свободном пространстве имеет место ослабление потока энергии электромагнитного поля с расстоянием. Следует уметь объяснить физику этого явления и записать математическое выражение для потерь передачи в свободном пространстве.

#### **Вопросы для самопроверки**

1. Как определить плотность потока энергии и напряженность поля ненаправленного и направленного излучателей в свободном пространстве?
2. Как формулируется принцип Гюйгенса-Френеля?
3. Как строятся зоны Френеля при РРВ в свободном пространстве?
4. Из каких соображений определяют существенную и минимальную области, влияющие на РРВ в свободном пространстве?
5. Как объяснить процесс ослабления электромагнитного поля в свободном пространстве?

### **3.2.15. Влияние поверхности Земли на распространение радиоволн**

Содержание данного раздела представлено в [2] на страницах 17-41.

В данном разделе необходимо усвоить, что поверхность Земли оказывает существенное влияние на РРВ. Это влияние учитывается введением множителя ослабления поля свободного пространства, который вычисляется, исходя из конкретного вида радиотрассы. Нужно знать электромагнитные параметры

основных разновидностей земной поверхности. Для определения множителя ослабления необходимо решить сложную задачу дифракции радиоволн вокруг реальной поверхности Земли. Следует иметь в виду, что в настоящее время эта задача, даже в самой строгой постановке, не учитывает неровностей поверхности Земли и решается для гладкой сферической поверхности. Получаемые, даже при такой постановке задачи, выражения, являются чрезвычайно сложными и расчёты множителя ослабления возможны только с применением ЭВМ, поэтому в инженерной практике, для некоторых радиотрасс, применяют приближённые методы решения, базирующиеся на интерференционных формулах в освещённой области и одночленной дифракционной формуле в области глубокой тени. Для учёта влияния реального распределения параметров Земли вдоль радиотрассы и неровностей её поверхности также применяют приближённые методы.

Следует обратить внимание на явления: береговой рефракции (искривление траекторий электромагнитной волны); эффект усиления величины электромагнитного поля за счёт препятствий; на скачкообразное изменение величины электромагнитного поля при переходе через границу участков трассы с различными электромагнитными параметрами.

Неровности на поверхности Земли распределены случайным образом, что приводит к необходимости применения методов математической статистики при исследовании процессов распространения радиоволн над подобными неровными поверхностями.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Как учитывают влияние поверхности Земли на РРВ?
2. Какими электромагнитными параметрами характеризуют поверхность Земли?
3. Как формулируют задачу дифракции радиоволн вокруг поверхности Земли?
4. Какие характерные области пространства принято выделять при изу-

чении РРВ вдоль поверхности Земли?

5. Какие приближённые формулы для расчёта множителя ослабления используют в освещённой области пространства?

6. Как рассчитывают множитель ослабления в области тени?

7. В чём заключается сущность явлений: береговой рефракции; усиления за счёт препятствия; изменения уровня поля при переходе через границу участков неоднородной трассы?

8. Как учитывают влияние распределённых случайным образом неровностей поверхности Земли при исследовании процессов распространения радиоволн над подобными неровными поверхностями?

### **3.2.16. Влияние атмосферы Земли на распространение радиоволн**

Содержание данного раздела представлено в [2] на страницах 41-75.

При изучении данного раздела необходимо учитывать, что атмосфера Земли является неоднородной средой и оказывает существенное влияние на распространение радиоволн различных диапазонов. Нужно знать особенности строения и состава атмосферы, распределения электромагнитных параметров атмосферы по высоте, изменение этих параметров во времени и пространстве. Следует обратить внимание на то, что неоднородное распределение электромагнитных параметров атмосферы приводит к рефракции, наблюдаемой как в тропосфере, так и в ионосфере, и имеющей несколько разновидностей. Особое внимание следует обратить на особенности РРВ в ионосфере, фазовую и групповую скорости распространения радиоволн, а также на влияние магнитного поля Земли на РРВ в ионосфере. Необходимо также знать механизмы ослабления энергии электромагнитного поля в атмосфере Земли и методы экспериментального исследования электромагнитных параметров тропосферы и ионосферы.

#### **Вопросы для самопроверки**

1. Какие области атмосферы Земли и в каких частотных диапазонах оказывают влияние на РРВ?

2. Как изменяются во времени и в пространстве электромагнитные па-

параметры различных областей атмосферы?

3. Какие виды тропосферной рефракции рассматривают при РРВ?
4. В чём заключается смысл введения понятия об эквивалентном радиусе Земли?
5. Каковы необходимые условия для отражения радиоволн от ионосферы?
6. К чему приводит зависимость электромагнитных параметров ионосферы от частоты?
7. Какие эффекты при РРВ в ионосфере связаны с наличием магнитного поля Земли?
8. Назовите механизмы потерь энергии электромагнитного поля в атмосфере.
9. Какими радиофизическими и метеорологическими методами исследуют состав и строение атмосферы?

### **3.2.17. Радиолинии различного назначения**

Содержание данного раздела приведено в [2] на страницах 75-90.

В данном разделе необходимо изучить возможные виды радиолиний, их назначение, диапазоны применяемых частот, особенности эксплуатации, а также методику расчёта в зависимости от конкретного вида радиотрассы, используя сведения об особенностях РРВ, полученные в предыдущих разделах программы.

#### **Вопросы для самопроверки**

1. В чём заключаются особенности расчёта линий радиовещания, радионавигации и радиосвязи в диапазонах сверхдлинных и длинных радиоволн?
2. Каковы особенности расчёта линий радиовещания, радионавигации и радиосвязи в диапазоне средних радиоволн?
3. Как рассчитывают параметры линий радиовещания и радиосвязи в диапазоне коротких радиоволн?
4. В чём заключаются особенности расчёта линий радиовещания, телевидения и радиосвязи метрового диапазона радиоволн?
5. В чём заключаются особенности расчёта линий радиолокации, теле-

видения, радиоуправления и телеметрии дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов радиоволн?

6. Каковы особенности расчёта радиолиний с использованием искусственных спутников Земли?

7. Каковы особенности расчёта радиолиний с использованием оптических квантовых генераторов?

### **Заключение**

Успешное освоение дисциплины «Электродинамика и распространение радиоволн» позволяет студенту получить фундаментальные знания в области радиотехники и использовать их при изучении последующих дисциплин учебного плана специальности «Радиотехника», таких как «Устройства СВЧ и антенны», «Устройства приема и обработки информации», «Устройства генерирования и формирования сигналов» и др.

### **3.3. Учебные пособия**

Калашников В.С. Электродинамика и распространение радиоволн (электродинамика): письменные лекции/ В.С. Калашников, Л.Я. Родос. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2002, 2004. – 92 с.

Родос Л.Я. Электродинамика и распространение радиоволн (распространение радиоволн): учебное пособие/ Л.Я. Родос. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007. – 88 с.

### **3.4. Глоссарий**

**Атмосфера** – газообразная оболочка Земли.

**Береговая рефракция** – изменение ориентации фазового фронта радиоволны при распространении радиоволны над разнородными участками подстилающей поверхности.

**Волноводное распространение** – распространение дециметровых, сантиметровых и миллиметровых радиоволн при сверхрефракции.

**Гиромагнитная частота** – частота вращения электронов по круговым траекториям вокруг силовых линий магнитного поля.

**Гюйгенсовские вторичные источники** – фиктивные вторичные источники на сферическом волновом фронте радиоволны.

**Дальнее тропосферное распространение** – распространение радиоволн УКВ диапазона за горизонт вследствие рассеяния радиоволн на неоднородностях тропосферы.

**Двойное лучепреломление** – расщепление отраженной волны в анизотропной ионосфере на два луча.

**Диапазон радиоволн** – определенный непрерывный участок длин радиоволн, которому присвоено условное наименование.

**Дифракция радиоволн** – изменение пространственной структуры поля радиоволны под влиянием препятствий, представляющих собой пространственные неоднородности среды распространения; приводит к огибанию радиоволной этих препятствий.

**Длинные радиоволны** – радиоволны длиной 1- 10 км.

**Закон секанса** – выражение, устанавливающее связь между частотами радиоволн, падающих на ионосферу наклонно и вертикально.

**Земная (поверхностная) волна** – радиоволна, распространяющаяся вдоль поверхности Земли.

**Зона молчания** – кольцевая область вокруг передатчика, в которой отсутствует прием коротких радиоволн.

**Зона Френеля** – реально не существующая область пространства либо поверхности, понятие о которой вводится для удобства описания и анализа процесса распространения радиоволн.

**Индекс рефракции** – математическая величина, связанная с коэффициентом преломления среды.

**Интерференция электромагнитных волн** – явление усиления или ослабления интенсивности радиоволны, наблюдаемое при суперпозиции (сложении) когерентных, поляризованных в одной плоскости радиоволн, в зависимости от соотношения их фаз.

**Интерференционная формула** – выражение для множителя ослабления,

позволяющее учесть влияние поверхности Земли на распространение радиоволн.

**Ионосферная (пространственная) волна** – радиоволна, распространяющаяся за счет отражения от ионосферы.

**Квадратичная формула Введенского** – формула, являющаяся частным случаем интерференционной, в которой амплитуда напряженности поля изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния между точками излучения и приема радиоволн.

**Короткие волны** – радиоволны длиной 10 – 100 м.

**Коэффициент отражения** - отношение определенной составляющей напряженности электрического поля в отраженной радиоволне к той же самой составляющей в падающей волне.

**Критическая частота** – частота радиоволны, при которой нормально падающий луч отражается от ионосферы и коэффициент отражения равен единице.

**Луч Педерсена** – крутой луч с большим радиусом кривизны, преодолевающий заданное расстояние вдоль поверхности Земли при однократном отражении радиоволны от ионосферы.

**Магнитное поле Земли** – поле, существующее вокруг Земли и оказывающее силовое воздействие на любые электрически заряженные частицы, движущиеся в окружающем Землю пространстве, а также на любые намагниченные тела.

**Максимально применимая частота** – наивысшая частота радиоизлучения, на которой существует ионосферное распространение радиоволн между заданными пунктами в заданное время в определенных условиях.

**Метод зеркальных изображений** – метод, позволяющий учитывать влияние подстилающей поверхности на распространение радиоволн над этой поверхностью.

**Множитель ослабления** – множитель, позволяющий учесть влияние реальной среды на распространение радиоволн.

**Модуль множителя ослабления** – модуль комплексного числа (множителя ослабления).

**Необыкновенная волна** – один из лучей при двойном лучепреломлении радиоволны в анизотропной ионосфере, критическая частота которого выше критической частоты обыкновенной волны.

**Нормальная рефракция** – один из видов положительной рефракции, при которой эквивалентный радиус Земли равен 8500 км.

**Нормальная тропосфера** – тропосфера, в которой радиус кривизны траектории радиоволны является положительной величиной, равной 25000 км.

**Область прямой видимости** – часть околоземного пространства над плоскостью горизонта, проходящей через точки излучения и приема, касательной к поверхности Земли.

**Область, существенная для распространения** – область, содержащая порядка десяти зон Френеля.

**Область тени** – область пространства, расстояние до любой точки которой от точки наблюдения, больше расстояния прямой видимости

**Обыкновенная волна** – один из лучей при двойном лучепреломлении радиоволны в анизотропной ионосфере, критическая частота которого ниже критической частоты необыкновенной волны.

**Оптимальная рабочая частота** – частота радиоизлучения ниже максимальной применимой частоты, на которой может осуществляться устойчивая радиосвязь в определенных геофизических условиях.

**Оптические радиоволны** – радиоволны длиной  $10^{-7} - 10^{-3}$  м.

**Отрицательная рефракция** – атмосферная рефракция радиоволн, имеющая место в тропосфере при возрастающем с высотой коэффициенте преломления воздуха.

**Параболическая аппроксимация** – приближенное аналитическое выражение для закона распределения электронной плотности в слое ионосферы.

**Плазменная частота (Ленгмюра)** – частота радиоволны, при которой

диэлектрическая проницаемость ионосферы обращается в ноль.

**Поглощение (ослабление) радиоволн** – процесс уменьшения уровня радио сигнала при распространении радиоволн.

**Положительная рефракция** – атмосферная рефракция радиоволн, имеющая место в тропосфере, при убывающем с высотой коэффициенте преломления воздуха.

**Помехи в работе радиoliniи** – посторонние радиосигналы, мешающие приему полезных радиосигналов.

**Приближение Борна** – предположение, позволяющее получить аналитическое выражение для коэффициента рассеяния при дальнем тропосферном распространении радиоволн.

**Приведенные высоты** – высоты антенных устройств, позволяющие учесть влияние сферичности поверхности Земли на распространение радиоволн.

**Принцип Гюйгенса – Френеля** – предположение, позволяющее решить электродинамическую задачу о форме и размерах области пространства, эффективно участвующей в передаче электромагнитной энергии от передающей к приемной антенне.

**Радиус зоны молчания** – расстояние от места расположения коротковолнового передатчика до точек, в которые не приходят поверхностные и пространственные радиоволны.

**Радиус кривизны траектории радиоволны** – величина, определяемая значением вертикального градиента индекса рефракции в тропосфере.

**Расстояние прямой видимости** – расстояние, равное длине прямой, касательной к поверхности Земли, соединяющей точки передачи и приема.

**Рефракция радиоволн** – изменение направления распространения радиоволн (искривление траектории радиоволн) вследствие изменения скорости их распространения при прохождении через неоднородную среду.

**Сверхдлинные радиоволны** – радиоволны длиной  $10^4 - 10^5$  м.

**Сверхрефракция** – положительная атмосферная рефракция, при которой

индекс рефракции меньше критического индекса рефракции.

**Свистящий атмосферик** – радиосигнал, возникающий при грозовых разрядах и оказывающий мешающее действие на работу радиосистем в диапазонах сверхдлинных и длинных радиоволн.

**Скачки напряженности поля** – быстрые изменения напряженности электромагнитного поля вследствие влияния свойств подстилающей поверхности.

**Средние радиоволны** – радиоволны длиной  $10^2 - 10^3$  м.

**Турбулентное движение воздуха** – беспорядочное движение воздуха в тропосфере, приводящее к образованию вихрей различных размеров.

**Ультракороткие радиоволны** – радиоволны длиной  $10^{-3} - 10$  м.

**Уравнение траектории** – аналитическое выражение для траектории радиоволны.

**Уравнение радиосвязи** – аналитическое выражение для определения напряженности или мощности электромагнитного поля в точке наблюдения.

**Участок поверхности, существенный для отражения** – участок, имеющий эллиптическую форму, вытянутый в направлении приемной антенны, образованный несколькими первыми зонами Френеля.

**Формула идеальной радиосвязи** – аналитическое выражение для определения напряженности либо мощности электромагнитного поля в точке наблюдения, расположенной в свободном пространстве.

**Численное (нормированное) расстояние** – аргумент множителя ослабления электромагнитного поля при дифракции радиоволн на земной поверхности.

**Эквивалентный радиус Земли** – величина, вводимая для учета влияния атмосферной рефракции при распространении радиоволн в неоднородной тропосфере.

**Эффект Фарадея** – явление поворота плоскости поляризации радиоволны, распространяющейся в ионосфере.

**Эхо на коротких волнах** – явление приема в точке наблюдения кроме прямой

волны, пришедшей по кратчайшему пути, волны, обогнувшей поверхность Земли один или несколько раз.

### **3.5. Методические указания к проведению практических занятий**

Учебным планом по курсу Электродинамика и распространение радиоволн предусмотрено проведение практических занятий при дневной форме обучения студентов.

Целью практических занятий является закрепление теоретических знаний и приобретение практических навыков решения задач.

В ходе занятий следует: кратко повторить основные теоретические положения, относящиеся к тематике решаемых задач, приведенных в разделе 2.5; рассмотреть алгоритмы решения задач, аналогичных задачам контрольных работ №1 и №2 Блока контроля освоения дисциплины; выполнить решение нескольких задач с использованием произвольных числовых данных.

Для осуществления промежуточного контроля на одном из последних занятий необходимо провести контрольную работу.

### **3.6. Методические указания к выполнению лабораторных работ.**

#### **Введение**

В процессе изучения дисциплины Электродинамика и распространение радиоволн необходимо выполнить шесть лабораторных работ, которые относятся к первой и второй частям курса. Темы лабораторных работ и объем часов, отводимых на их выполнение, приведены в разделе 2.5.

Лабораторный практикум предназначен для закрепления знаний, полученных на лекциях по курсу «Электродинамика и распространение радиоволн (электродинамика)», и привития студентам навыков самостоятельной исследовательской работы в области электродинамики и распространения радиоволн.

В содержание лабораторных работ, наряду с экспериментальными исследованиями, включены теоретические расчёты, результаты которых сравниваются с опытными данными. Это даёт возможность выработки навыков правильной оценки результатов исследования, установления пределов приме-

нимости изученных теоретических положений и понимания причин расхождения результатов эксперимента и расчёта.

Перед выполнением каждой лабораторной работы студент должен повторить теорию физических процессов, исследуемых в ней, по приведенной литературе и изучить по настоящему учебному пособию описание лабораторной установки, на которой будет выполняться работа. В результате студент должен знать: цель и содержание лабораторной работы, схему лабораторной установки, методику измерений, характер ожидаемых результатов и физическую сущность исследуемых явлений.

Каждый студент должен строго соблюдать все положения «Инструкции по технике безопасности в лаборатории», с которой студентов знакомит преподаватель перед началом занятий. Прежде чем приступать к выполнению лабораторной работы, студенты должны убедиться в правильности сборки лабораторной установки. Источники питания приборов можно включать только с разрешения руководителя занятий. При возникновении неисправностей в работе приборов следует обращаться к руководителю занятий и только под его наблюдением устранять неисправности. После включения питания измерительных приборов и установки рекомендуемого режима работы, необходимо проследить по приборам общий ход исследуемой зависимости, убедиться в его соответствии положениям теории и лишь, затем приступать к детальным исследованиям и получению количественных данных.

Работа считается законченной после просмотра и утверждения материалов по ней преподавателем. По всем лабораторным работам каждый студент составляет итоговый отчёт, который включает в себя отчёты по каждой лабораторной работе, содержащие разделы: постановки задачи исследования; решения задачи и выводов по работе, где следует дать краткое теоретическое обоснование полученных экспериментальных данных, объяснить расхождение между расчётными и опытными данными, произвести оценку погрешностей при измерениях. Необходимые графики сопровождаются пояснительной надписью. Расчёту отдельных величин должно предшествовать краткое пояснение и со-

ответствующая формула. Итоговый отчёт каждый студент должен сдать преподавателю на проверку.

### **3.6.1. Исследование поляризации электромагнитного поля**

#### **Цель работы**

Экспериментальное исследование поляризации электромагнитного поля в виде гармонических электромагнитных волн.

#### **Основные теоретические положения**

Одним из важнейших свойств, которым обладает электромагнитное поле, а также его излучатели (передающие антенны) и индикаторы (приёмные антенны), является поляризация. Поляризация электромагнитного поля есть физическая величина, т. е. измеряемая характеристика электромагнитного поля, показывающая, как изменяются модули (длины) и направления векторов электромагнитного поля в пространстве и во времени. Если указанные изменения происходят определённым образом (детерминированно), то электромагнитное поле считают поляризованным, если же указанные изменения происходят случайным образом (хаотически), то электромагнитное поле считают неполяризованным. В поляризованном электромагнитном поле поляризацию электромагнитного поля принято определять (в электродинамике) по виду линии, которую как бы “вычерчивает” в пространстве за определённый промежуток времени конец вектора напряжённости  $\vec{E}$  распространяющегося в пространстве электромагнитного поля. Плоскость, проходящую через вектор напряжённости  $\vec{E}$  и вектор Пойнтинга  $\vec{P}$  электромагнитного поля, в электродинамике принято называть плоскостью поляризации, т.к. именно в этой плоскости всегда находится вектор напряжённости  $\vec{E}$  электромагнитного поля, изменения модуля (длины) и направления которого характеризуют поляризацию электромагнитного поля. Если положение плоскости поляризации в пространстве всё время остаётся постоянным и конец вектора напряжённости  $\vec{E}$ , распространяющегося в пространстве электромагнитного поля, “вычерчивает” в плоскости поляризации за определённый промежу-

ток времени некоторую плоскую линию, то такую поляризацию называют плоской. Если же положение плоскости поляризации в пространстве не остаётся постоянным во времени, а эта плоскость всё время поворачивается определённым образом вокруг вектора Пойнтинга  $\vec{P}$ , распространяющегося в пространстве электромагнитного поля, то такую поляризацию называют вращающейся.

В лабораторной работе исследуется поляризация электромагнитного поля в виде гармонической электромагнитной волны, распространяющейся из точки излучения, где располагается излучатель (передающая антенна), в точку наблюдения, где располагается индикатор (приёмная антенна). В случае электромагнитного поля в виде гармонической электромагнитной волны тип поляризации определяют по виду линии, которую “вычерчивает” конец вектора напряжённости  $\vec{E}$  за один или несколько периодов  $T$  гармонических колебаний во времени этого вектора. При линейной поляризации конец вектора напряжённости  $\vec{E}$  гармонической электромагнитной волны описывает в плоскости поляризации, за один или несколько периодов  $T$  гармонических колебаний во времени этого вектора, синусоиду (или косинусоиду); при вращающейся поляризации конец вектора напряжённости  $\vec{E}$  гармонической электромагнитной волны описывает в пространстве за указанный промежуток времени круговую или эллиптическую спираль с осью, совпадающей по направлению с направлением вектора Пойнтинга  $\vec{P}$  гармонической электромагнитной волны, распространяющейся из точки излучения в точку наблюдения.

При теоретических исследованиях, наиболее часто, тип поляризации гармонической электромагнитной волны выясняют, исследуя вид годографа, который “вычерчивает” за один или несколько периодов  $T$  гармонических колебаний во времени конец вектора напряжённости  $\vec{E}$  гармонической электромагнитной волны в плоскости, расположенной в неподвижной точке наблюдения перпендикулярно к направлению распространения гармонической

электромагнитной волны. При этом, в случае линейной поляризации, конец вектора  $\vec{E}$  ”вычерчивает” в указанной плоскости прямолинейный отрезок, в случае круговой поляризации конец вектора  $\vec{E}$  ”вычерчивает” в указанной плоскости окружность, а в случае эллиптической поляризации конец вектора  $\vec{E}$  ”вычерчивает” в указанной плоскости эллипс. Эти геометрические фигуры в виде прямолинейного отрезка, окружности и эллипса, характеризующие тип поляризации гармонической электромагнитной волны, называют поляризационными характеристиками гармонической электромагнитной волны.

Можно показать, что поляризация любого вида может быть получена с помощью суперпозиции двух ортогональных в пространстве гармонических электромагнитных волн линейной поляризации, амплитуды и фазы которых могут принимать различные значения. Линейная поляризация имеет место в следующих случаях: 1) амплитуда одной из двух ортогональных гармонических электромагнитных волн линейной поляризации равна нулю, амплитуда другой ортогональной гармонической электромагнитной волны линейной поляризации не равна нулю, а фаза её может принимать любые значения; 2) амплитуды обеих ортогональных, гармонических электромагнитных волн линейной поляризации отличны от нуля, а их фазы или одинаковы, или отличаются на  $180^\circ$ . При линейной поляризации вектор напряженности  $\vec{E}$  электромагнитной волны, в неподвижной точке наблюдения не меняет своей ориентации в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения электромагнитной волны, а длина вектора напряженности  $\vec{E}$  этой электромагнитной волны изменяется во времени по гармоническому закону с частотой  $f = 1/T$ , при этом конец вектора  $\vec{E}$  ”вычерчивает” в указанной плоскости прямолинейный отрезок.

Круговая поляризация может быть получена когда амплитуды обеих ортогональных, гармонических электромагнитных волн линейной поляризации равны между собой, а их фазы отличаются на  $90^\circ$  либо на  $270^\circ$ . При кру-

говой поляризации вектор напряжённости  $\vec{E}$  электромагнитной волны в точке наблюдения равномерно вращается в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения электромагнитной волны с круговой частотой  $\omega=2\pi f$  без изменения своей длины; конец вектора  $\vec{E}$  ”вычерчивает” в указанной плоскости окружность.

Эллиптическая поляризация имеет место в случаях, когда:

1) амплитуды обеих ортогональных гармонических электромагнитных волн линейной поляризации в точке излучения не равны между собой, а их фазы также не равны друг другу и не отличаются между собой на  $180^\circ$ ;

2) амплитуды обеих ортогональных гармонических электромагнитных волн линейной поляризации в точке излучения равны между собой, а их фазы не равны и не отличаются друг от друга на  $90^\circ, 180^\circ$  и  $270^\circ$ . При эллиптической поляризации вектор напряжённости  $\vec{E}$  электромагнитной волны в точке наблюдения вращается с круговой частотой  $\omega=2\pi f$  в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения электромагнитной волны, и его длина изменяется по гармоническому закону с частотой  $f=1/T$ ; конец вектора  $\vec{E}$  ”вычерчивает” в указанной плоскости эллипс.

При экспериментальном исследовании поляризации электромагнитного поля в любой точке наблюдения, выбираемой наблюдателем по своему усмотрению, необходимо, прежде всего, обнаружить это электромагнитное поле в выбранной точке наблюдения. Для обнаружения электромагнитного поля обязательно применяют различные индикаторы электромагнитного поля, называемые приёмными антеннами. Любой индикатор электромагнитного поля, как и само электромагнитное поле, обладает свойством, называемым поляризацией индикатора электромагнитного поля. Ввиду того, что любой индикатор электромагнитного поля обязательно обладает свойством поляризации и, ввиду того, что свойством поляризации обладает и электромагнитное поле, которое должен обнаружить индикатор, то в процессе обнаружения электромагнитного поля индикатором, их поляризации обязательно взаимодействуют (влияют друг на друга). При

этом на выходе индикатора обязательно будет электромагнитное поле, поляризация которого есть результат суперпозиции поляризаций исследуемого электромагнитного поля и применённого для такого экспериментального исследования индикатора электромагнитного поля.

Таким образом, поляризация индикатора электромагнитного поля обязательно влияет на оценку (измерение) поляризации того электромагнитного поля, которое обнаруживается с помощью указанного индикатора. Для того чтобы определить искомую поляризацию исследуемого электромагнитного поля на входе индикатора электромагнитного поля, необходимо и достаточно измерить сигнал на выходе индикатора и знать поляризацию самого индикатора электромагнитного поля. Итак, при экспериментальном исследовании поляризации электромагнитного поля необходимо обязательно знать поляризацию индикатора электромагнитного поля. Естественно, что при экспериментальном исследовании поляризации электромагнитного поля стараются выбирать индикаторы электромагнитного поля с наиболее простыми поляризационными характеристиками, например, стараются выбирать индикаторы с плоской (линейной) поляризацией. Индикаторы электромагнитного поля с прямолинейной поляризационной характеристикой называют анализаторами электромагнитного поля. Именно анализаторы электромагнитного поля наиболее часто применяют при экспериментальном исследовании поляризации электромагнитного поля. Применение анализаторов электромагнитного поля при экспериментальном исследовании поляризации электромагнитного поля целесообразно ещё и потому, что в этом случае метод экспериментального исследования поляризации электромагнитного поля наиболее физически и математически обоснован, т.к. базируется на физическом законе французского инженера Этьена Луи Малюса (1775-1812 г.). Закон Малюса, открытый и сформулированный в 1810 году, гласит, что, если электромагнитное поле в выбранной точке наблюдения на входе анализатора электромагнитного поля плоско (линейно) поляризовано, то энергия электромагнитного поля  $W(\gamma)$

на выходе анализатора определяется соотношением:

$$W(\gamma) = \kappa \cdot W_0 \cdot \cos^2 \gamma, \quad (3.1)$$

где  $W_0$  - энергия электромагнитного поля на входе анализатора;  $\kappa$  - коэффициент “прозрачности анализатора”, учитывающий потери электромагнитной энергии при прохождении электромагнитного поля через анализатор;  $\gamma$  - величина угла между плоскостью поляризации электромагнитного поля на входе анализатора и плоскостью поляризации анализатора.

При этом следует иметь в виду, что любой анализатор (индикатор) электромагнитного поля может работать как излучатель электромагнитного поля (выполняется принцип взаимности), а плоскость поляризации анализатора совпадает с плоскостью поляризации того электромагнитного поля, которое создаёт анализатор, работающий в режиме излучателя электромагнитного поля. Из соотношения (3.1) следует, в частности, что при линейной поляризации электромагнитного поля на входе анализатора наибольшая величина энергии на выходе анализатора будет в том случае, когда положение плоскости поляризации исследуемого электромагнитного поля на входе анализатора совпадает с положением плоскости поляризации анализатора.

Если электромагнитное поле на входе анализатора имеет эллиптическую или круговую поляризацию, то вектор напряжённости  $\vec{E}$  поля необходимо представить в виде суперпозиции двух ортогональных в пространстве, линейно поляризованных компонентов. К каждому линейно поляризованному компоненту применить закон Малюса (3.1), просуммировать результаты и получить соответствующие аналитические выражения для энергии  $W(\gamma)$  электромагнитного поля на выходе анализатора.

Графики функций  $W(\gamma)$  на выходе анализатора, для случаев линейной, эллиптической и круговой поляризаций электромагнитного поля на входе анализатора, называют поляризационными диаграммами. В поляр-

ной системе координат график функции  $W(\gamma)$  в случае линейной поляризации электромагнитного поля на входе анализатора имеет вид “восьмёрки”; график функции  $W(\gamma)$  в случае эллиптической поляризации электромагнитного поля на входе анализатора имеет вид “гантели”; график функции  $W(\gamma)$  в случае круговой поляризации электромагнитного поля на входе анализатора имеет вид окружности.

При экспериментальном исследовании поляризации электромагнитного поля на входе анализатора обычно строят, так называемые, нормированные поляризационные диаграммы. Для этого все значения  $W(\gamma)$ , полученные экспериментально при различных значениях  $\gamma$ , делят на максимальное значение  $W(\gamma)$ , равное например  $W_{\max}$ , и получают нормированные значения:

$$W_{\text{нор}}(\gamma) = \frac{W(\gamma)}{W_{\max}} \quad (3.2)$$

Например, из соотношения (3.1) следует, что в случае линейной поляризации электромагнитного поля на входе анализатора нормированная

поляризационная диаграмма  $W_{\text{нор}}(\gamma)$  имеет

вид:  $W_{\text{нор}}(\gamma) = \cos^2 \gamma$ , так как  $W_{\max} = \kappa \cdot W_0$ .

В полярной системе координат нормированные поляризационные диаграммы для линейной, эллиптической и круговой поляризаций электромагнитного поля на выходе анализатора имеют вид, представленный на рис.3.1а, б, в соответственно.

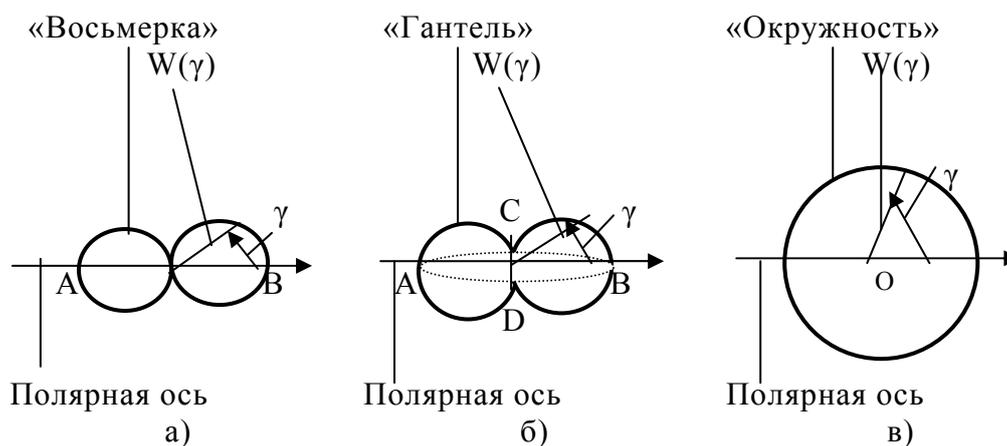


Рис. 3.1

Поляризациянная диаграмма характеризует поляризацию электромагнитного поля на выходе анализатора, т.е. характеризует совокупность искомой поляризации электромагнитного поля на входе анализатора и поляризации самого анализатора. Сведения об искомой поляризации электромагнитного поля на входе анализатора можно получить из поляризациянных диаграмм, действуя так, как показано на рис. 3.1. В случае линейной поляризации электромагнитного поля на входе анализатора нормированная поляризациянная характеристика электромагнитного поля будет иметь форму прямолинейного отрезка [AB], построенного на нормированной поляризациянной диаграмме (рис. 3.1, а); в случае эллиптической поляризации электромагнитного поля на входе анализатора нормированная поляризациянная характеристика электромагнитного поля на входе анализатора будет иметь форму эллипса, построенного пунктиром на нормированной поляризациянной диаграмме (рис. 3.1, б) так, что прямолинейный отрезок [AB] является большой осью эллипса, а прямолинейный отрезок [CD] является малой осью эллипса; наконец, в случае круговой поляризации электромагнитного поля на входе анализатора нормированная поляризациянная характеристика электромагнитного поля на входе анализатора будет иметь форму окружности, т.е. совпадает по форме с нормированной поляризациянной диаграммой, представленной на рис. 3.1, в.

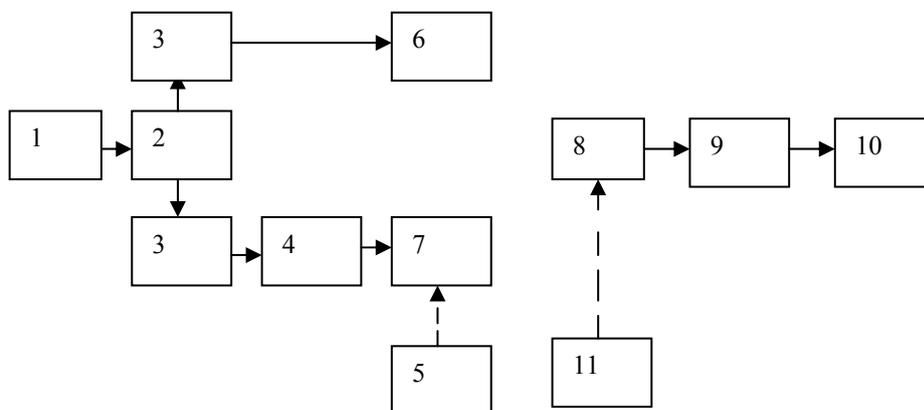
### Описание лабораторной установки

Структурная схема лабораторной установки представлена на

рис.3.2. Передающая антенна установки, предназначенная для излучения электромагнитных волн того или иного вида поляризации, состоит из двух волноводных каналов, электромагнитная энергия к каждому из которых подводится от высокочастотного генератора 1 через волноводный тройник 2. В волноводные тракты обоих каналов включены аттенюаторы 3, предназначенные для регулировки амплитуд электромагнитного поля в соответствующем канале. В тракт одного из каналов включен также фазовращатель 4, позволяющий изменять в этом канале фазу электромагнитной волны, этот же канал имеет механизм 5 перемещения волновода, обеспечивающий возможность создания сдвига фаз между ортогональными электромагнитными волнами, излучаемыми из открытых концов волноводов обоих каналов, за счет изменения расстояния до анализатора.

В качестве излучателей электромагнитной энергии в каждом из каналов применены открытые концы прямоугольных волноводов 6 и 7, расположенные ортогонально один относительно другого и излучающие, каждый в отдельности, гармонические электромагнитные волны линейной поляризации.

Приёмная часть лабораторной установки, предназначенная для индикации энергии электромагнитного поля, состоит из: приёмной антенны (анализатора) 8 в виде открытого конца прямоугольного волновода; детекторной секции 9 и индикаторного прибора 10. Приёмная антенна снабжена поворотным устройством 11, которое обеспечивает вращение антенны 8 вокруг горизонтальной оси на угол  $360^\circ$ .



### Порядок выполнения лабораторной работы

1. Включить генератор 1 и настроить его на рабочую частоту по заданию преподавателя. При этом открытые концы волноводов 6 и 7 будут излучать гармонические электромагнитные волны линейной поляризации. Включить индикаторный прибор 10.

2. Повернуть приёмную антенну 8 так, чтобы широкие стенки её волновода были бы параллельны широким стенкам одного из излучающих волноводов передающей антенны.

3. Установить, с помощью аттенюатора излучающего волновода (п. 2), такие показания  $W$  электромагнитной мощности на выходе приёмной антенны 8, которые находятся примерно в середине шкалы индикаторного прибора 10.

4. Повернуть приёмную антенну 8 так, чтобы широкие стенки её волновода были бы параллельны широким стенкам другого из излучающих волноводов передающей антенны.

5. Установить, с помощью аттенюатора излучающего волновода п. 4, такие же показания  $W$  индикаторного прибора 10 как в п. 3.

6. Вращая приёмную антенну 8 так, чтобы широкие стенки её волновода располагались под углами  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $60^\circ$  к широким стенкам излучающих волноводов, установить для каждого значения угла, фазовращателем 4 либо путём небольших перемещений волновода 7 с помощью механизма перемещения 5, такие же показания  $W$  индикаторного прибора 10, как в п. 3 и в п. 5. При этом будут выполнены условия, необходимые для получения круговой поляризации.

7. Исследовать круговую поляризацию, поворачивая через  $\gamma=10^\circ$  приёмную антенну в пределах от  $\gamma=0^\circ$  до  $\gamma=360^\circ$  и фиксируя, при каждом положении приёмной антенны, показания индикаторного прибора 10. Построить нормированную поляризационную диаграмму.

8. Создать условия, необходимые для получения эллиптической поляризации. Для этого, не меняя положений фазовращателя 4 и механизма перемещения 5, установленных в п. 6, повернуть приёмную антенну 8 так, как указано в п. 2, и аттенюатором волноводного тракта, указанного в п. 2, установить показание индикаторного прибора 10 равное половине значения, установленного в п. 6. При этом будут выполнены условия, необходимые для получения эллиптической поляризации.

9. Исследовать эллиптическую поляризацию. Для этого повернуть приёмную антенну 8 так, чтобы индикаторный прибор 10 показал максимальное значение мощности. Далее действовать так, как в п.7. Построить нормированную поляризационную диаграмму.

10. Создать условия, необходимые для получения линейной поляризации. Для этого, повернуть приёмную антенну 8 в такое положение, когда индикаторный прибор 10 покажет минимальное значение мощности. С помощью фазовращателя 4 и механизма перемещения 5 добиться нулевого показания индикаторного прибора 10; тем самым установлен сдвиг фаз  $0^\circ$  или  $180^\circ$  и выполнено условие, необходимое для получения линейной поляризации.

11. Исследовать линейную поляризацию. Для этого повернуть приёмную антенну 8 так, как указано в п.9. Далее действовать так, как в п.7. Построить нормированную поляризационную диаграмму.

12. Построить нормированные поляризационные характеристики для круговой, эллиптической и линейной поляризаций электромагнитного поля, используя нормированные поляризационные диаграммы, построенные в п.7, 9,11.

### **Содержание отчёта по лабораторной работе**

- Структурная схема измерительной установки.
- Таблицы с измеренными и рассчитанными (нормированными) значениями величин, необходимыми для построения поляризационных диаграмм.
- Графический материал (нормированные поляризационные диаграммы и

характеристики).

- Краткие выводы по лабораторной работе.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Что называют поляризацией электромагнитного поля?
2. Какие типы поляризации электромагнитного поля Вы знаете?
3. Какой вид имеют поляризационные характеристики для линейной, круговой и эллиптической поляризации электромагнитного поля?
4. В чём состоит отличие поляризационной диаграммы от поляризационной характеристики электромагнитного поля?
5. Как с помощью поляризационных диаграмм можно построить поляризационные характеристики электромагнитного поля?

Литература: [1], с.36-39; [3], с.158-162.

### **3.6.2. Исследование электромагнитного поля основной волны в полом, прямоугольном, металлическом волноводе**

#### **Цель работы**

Исследование: структуры электромагнитного поля основной волны; зависимости режима работы волновода от вида его нагрузки; особенностей распространения электромагнитных волн в полом прямоугольном металлическом волноводе.

#### **Основные теоретические положения**

Прямоугольный полый металлический волновод является направляющей системой, служащей для передачи электромагнитной энергии от генератора к нагрузке. В таком волноводе могут распространяться электромагнитные волны магнитного  $H_{mn}$  или электрического  $E_{mn}$  типа. Причём, буквы  $H$  или  $E$  обозначают, что соответственно векторы  $\vec{H}$  или  $\vec{E}$  электромагнитной волны, распространяющейся в волноводе, имеют продольную составляющую, направленную вдоль продольной оси волновода. Индексы  $m$  и  $n$  указывают число полуволновых вариаций величин векторов  $\vec{H}$  и  $\vec{E}$  вдоль широкой и узкой стенок поперечного сечения волновода. Индексы  $m$  и  $n$  для волн типа

$H_{mn}$  могут принимать значения:  $m=0,1,2,3\dots$  и  $n=0,1,2,3\dots$ ; индексы  $m$  и  $n$  для волн типа  $E_{mn}$  могут принимать значения:  $m=1,2,3\dots$  и  $n=1,2,3\dots$ . Придавая индексам  $m$  и  $n$  конкретные значения, получают различные виды электромагнитных колебаний типа  $H_{mn}$  и  $E_{mn}$ , например волны вида  $H_{10}, E_{11}$  и т. д. Следует иметь в виду, что для волн типа  $H_{mn}$  индексы  $m$  и  $n$  одновременно не могут быть равны нулю, т.е. волна вида  $H_{00}$  в волноводе существовать не может.

Для создания в прямоугольном полом металлическом волноводе электромагнитных волн типа  $H_{mn}$  или  $E_{mn}$ , внутрь волновода помещают устройства возбуждения электромагнитных волн. Они имеют свою особую конструкцию для конкретного типа электромагнитной волны и представляют собой, практически, передающую антенну того или иного вида. Если в этой передающей антенне генератор создаёт электрический ток, изменяющийся во времени по гармоническому закону с частотой  $f$ , то такая антенна, находясь не внутри волновода, а в однородной среде с электромагнитными характеристиками  $\epsilon$  и  $\mu$  может создать гармоническую электромагнитную волну, имеющую длину  $\lambda$ , связанную с частотой  $f$ , называемой иногда рабочей частотой генератора, соотношением Релея вида:

$$\lambda = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\epsilon \cdot \mu}}, \quad (3.3)$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость распространения электромагнитных волн в вакууме;  $\epsilon$  и  $\mu$  — относительные электрическая и магнитная проницаемости среды, заполняющей волновод.

Электромагнитные волны распространяются внутри полого, металлического волновода только в том случае, если длина  $\lambda$  электромагнитной волны, определяемая соотношением (3.3) и называемая иногда рабочей длиной

волны генератора, будет меньше некоторой величины  $\lambda_{кр}^{\max}$ , называемой максимальной критической длиной волны в волноводе. В полом прямоугольном металлическом волноводе максимальную критическую длину имеет волна вида  $H_{10}$ . Она определяется соотношением:

$$\lambda_{кр}^{\max} = \lambda_{кр}^{H_{10}} = 2a, \quad (3.4)$$

где  $a$  — размер широкой стенки поперечного сечения полого прямоугольного металлического волновода.

Волну вида  $H_{10}$  называют основной волной полого прямоугольного металлического волновода.

Итак, для распространения электромагнитной волны внутри полого прямоугольного металлического волновода, необходимо соблюдение условия, чтобы длина волны генератора была меньше критической длины волны.

Но при соблюдении указанного условия внутри полого прямоугольного металлического волновода может распространяться не только основная волна вида  $H_{10}$ , но и другие (не основные, высшие) волны, для которых данное условие соблюдается. Система возбуждения электромагнитных волн в данной лабораторной установке позволяет создавать в прямоугольном волноводе только основную волну вида  $H_{10}$ , но при отражении ее от различных неоднородностей, находящихся внутри волновода (например, от зондов, являющихся возбудителями и индикаторами электромагнитных волн), могут появляться также не основные волны различных видов, например вида  $H_{01}$ ,  $H_{20}$ ,  $E_{11}$  и другие.

Для того, чтобы внутри полого прямоугольного металлического волновода распространялась только волна вида  $H_{10}$  необходимо и достаточно, чтобы рабочая длина волны генератора  $\lambda$  была меньше критической длины

волны основного типа, но больше критической длины волны ближайшего высшего типа  $H_{20}$ , которая может появиться в волноводе, применяемом в лабораторной работе, из-за переотражений.

Электромагнитная волна, созданная устройством возбуждения внутри волновода, отражаясь от стенок волновода, превращается в направляемую электромагнитную волну в волноводе, длина  $\lambda_B$  которой определяется соотношением:

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}}, \quad (3.5)$$

где  $\lambda$  определяется из (3.3), а  $\lambda_{кр}$  — из (3.4), если волновод работает только на основной волне  $H_{10}$ .

Фазовая скорость  $v_\phi$  направляемой электромагнитной волны волновода определяется соотношением:

$$v_\phi = f \cdot \lambda_B = \frac{f \cdot \lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu \cdot [1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2]}}, \quad (3.6)$$

а групповая скорость  $v_{гр}$  этой волны связана с  $v_\phi$  зависимостью:

$$v_\phi \cdot v_{гр} = c^2. \quad (3.7)$$

В зависимости от вида нагрузки волновода, в нём могут существовать режимы: бегущих, стоячих и смешанных волн. Для создания в волноводе режима бегущих волн нагрузка волновода должна быть согласованной, т. е. сопротивление нагрузки должно быть равно волновому сопротивлению волновода. В режиме согласованной нагрузки вся электромагнитная энергия, передаваемая от генератора по волноводу, поглощается в нагрузке. Если волновод

замкнуть накоротко (закрыть) металлической пластиной, то электромагнитная волна, “упавшая” на пластину, в первом приближении, полностью отразится в сторону генератора, а в волноводе установится режим стоячих волн. При открытом волноводе часть электромагнитной энергии будет излучена в окружающее волновод пространство, а часть — отразится в сторону генератора, и в волноводе установится режим смешанных волн. Количественной характеристикой каждого из возможных режимов работы волновода служит коэффициент бегущей волны  $K_{BB}$ , определяемый соотношением:

$$K_{BB} = \frac{E_{\min}}{E_{\max}}, \quad (3.8)$$

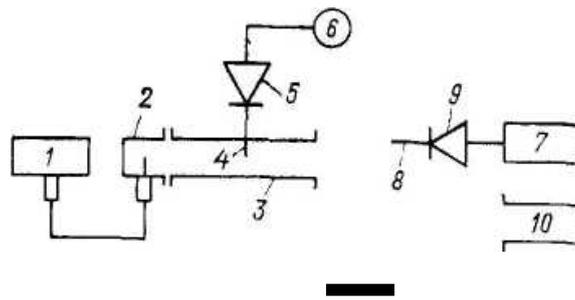
где  $E_{\min}$  и  $E_{\max}$  — величины вектора напряжённости  $\vec{E}$  в минимуме и максимуме электромагнитного поля, существующего внутри волновода при различных режимах его работы.

Коэффициент бегущей волны  $K_{BB}$  может изменяться в пределах от нуля (в режиме стоячих волн) до единицы (в режиме бегущих волн). Зная  $K_{BB}$ , можно определить модуль коэффициента отражения  $\rho_{отр}$  электромагнитной энергии от нагрузки волновода:

$$\rho_{отр} = \left( \frac{1 - K_{BB}}{1 + K_{BB}} \right)^2. \quad (3.9)$$

### Описание лабораторной установки

Структурная схема установки показана на рис. 3.3. В состав установки входят: генератор электромагнитной энергии 1, коаксиально-волноводный переход 2, волноводная измерительная линия 3 с зондом 4 и детектором 5, индикатор 6, волномер 7 с зондом 8 и детектором 9, согласованная нагрузка 10 и металлическая пластина 11.



11

Рис. 3.3

С помощью измерительной линии 3, зонд 4 которой расположен вдоль силовых линий вектора напряжённости  $\vec{E}$ , измеряется длина волны  $\lambda_B$  в волноводе и коэффициент бегущей волны  $K_{БВ}$  при различных режимах работы волновода. Волномер 7 служит для исследования структуры электромагнитной волны типа  $H_{10}$ , возбуждаемой в волноводе.

### Порядок выполнения работы

1. Измерить длины  $a$  и  $b$  широкой и узкой стенок волновода, убедиться, что  $\lambda_{кр}^{H_{20}} = a$  больше, чем  $\lambda_{кр}^{H_{01}} = 2b$  и что ближайшей к основной волне  $H_{10}$  является не основная волна  $H_{20}$ ; включить генератор 1 и настроить его на одну из частот  $f$ , заданных преподавателем. При этом в волноводе будет возбуждена основная волна вида  $H_{10}$ .

2. Исследовать структуру электрического поля волны  $H_{10}$ . Для этого: расположить зонд 8 волномера 7 в плоскости поперечного сечения перпендикулярно к широкой стенке на выходе волновода; настроить волномер 7 по максимуму показаний его индикатора на частоту  $f$  п.1; перемещать зонд 8 волномера 7 вдоль всей длины широкой стенки волновода, отмечая положения зонда 8 относительно широкой стенки волновода и записывая показания индикатора волномера 7. Аналогичные измерения провести вдоль узкой стенки поперечного сечения волновода. Расположить зонд 8 волномера 7 вдоль оси

волновода параллельно широким и узким стенкам волновода. Перемещая зонд 8 вдоль широкой стенки волновода, снять показания индикатора волномера, действуя так, как указано выше. Результаты измерений по п.2 занести в таблицы и на основании полученных данных изобразить структуру электрического поля волны вида  $H_{10}$  в волноводе, учитывая, что показания индикатора будут отличны от нуля, если зонд направлен вдоль линии напряжённости электрического поля, и равны нулю, если зонд перпендикулярен к указанным линиям напряжённости.

3. Измерить длину  $\lambda_B$  направляемой волны в волноводе с помощью измерительной линии 3. Для этого: замкнуть выход волновода короткозамыкателем 11; перемещать зонд 4 измерительной линии 3 и следить за показаниями индикатора 6, фиксируя положения двух соседних минимумов электромагнитного поля внутри волновода; измерить расстояние между двумя соседними минимумами электромагнитного поля внутри волновода по шкале измерительной линии. Искомая длина  $\lambda_B$  направляемой волны в волноводе равна удвоенному измеренному расстоянию между двумя соседними минимумами электромагнитного поля внутри волновода.

4. Рассчитать критическую длину волны  $\lambda_{кр}$  волновода, работающего на волне вида  $H_{10}$ , используя соотношение (3.4).

5. Рассчитать рабочую длину волны  $\lambda$  генератора в воздухе, заполняющем волновод, используя соотношение (3.3).

6. Рассчитать длину  $\lambda_B$  направляемой волны в волноводе, используя соотношение (3.5). Сравнить, измеренную в п.3 длину волны, с рассчитанным значением  $\lambda_B$ .

7. Рассчитать фазовую  $v_\phi$  и групповую  $v_{гр}$  скорости направляемой электромагнитной волны волновода, используя соотношения (3.6) и (3.7), учитывая,

что  $f$  и  $\lambda$  определены в предыдущих пунктах.

8. Исследовать режимы работы открытого, короткозамкнутого и нагруженного на согласованную нагрузку волновода. Для этого, полагая квадратичной вольт-амперную характеристику детектора 5 измерительной линии 3 и перемещая зонд 4 вдоль линии 3, фиксировать с помощью индикатора 6 минимальное  $W_{\min}$  и максимальное  $W_{\max}$  значения электромагнитной энергии для случаев открытого, короткозамкнутого и нагруженного на согласованную нагрузку волновода. Полученные значения  $W_{\min}$  и  $W_{\max}$  занести в таблицу.

9. Рассчитать  $K_{BB}$  для режимов работы волновода, указанных в п.8, учитывая, что, в случае квадратичной вольт-амперной характеристики детектора 5,

$$K_{BB} = (E_{\min} / E_{\max}) = \sqrt{W_{\min} / W_{\max}} .$$

10. Рассчитать, используя соотношение (3.9),  $\rho_{отр}$  для трёх режимов работы волновода, используя значения  $K_{BB}$ , полученные в п. 9.

### Содержание отчёта

- Структурная схема лабораторной установки.
- Результаты измерений и расчётов по п. 1 — 10.
- Краткие выводы по результатам работы.

### Вопросы для самопроверки

1. Какие типы электромагнитных волн могут распространяться в полых прямоугольных металлических волноводах?
2. Как обозначают основную волну полого прямоугольного металлического волновода?
3. Как определяется критическая длина основной волны полого прямоугольного металлического волновода?
4. Какое условие, обеспечивает работу полого прямоугольного металлического волновода лабораторной установки только на основной волне?
5. Как определить коэффициент бегущей волны в волноводе?

6. Как определить длину направляемой электромагнитной волны в волноводе с помощью волноводной измерительной линии?

Литература:[1] с. 49-51; 63-69; [3] с.220-224;230-234;242-245.

### **3.6.3. Исследование электромагнитного поля в цилиндрическом объёмном резонаторе**

#### **Цель работы**

Исследование структуры электромагнитного поля колебания  $H_{111}$ , изучение методов возбуждения и расчёта указанного колебания в полном металлическом цилиндрическом объёмном резонаторе.

#### **Основные теоретические положения**

Полый металлический цилиндрический объёмный резонатор является колебательной системой с распределёнными параметрами, которая используется в диапазоне СВЧ вместо колебательных контуров с сосредоточенными параметрами.

Цилиндрический объёмный резонатор представляет собой металлический цилиндр, изготавливаемый из полого цилиндрического металлического волновода путём установки на некотором расстоянии друг от друга в плоскости поперечного сечения волновода двух металлических пластин, являющихся основаниями цилиндра. В цилиндрическом полном металлическом волноводе, также как и в прямоугольном, могут распространяться электромагнитные волны магнитного  $H_{mn}$  или электрического  $E_{mn}$  типа. Причём, буквы  $H$  или  $E$  обозначают, что, соответственно, векторы  $\vec{H}$  или  $\vec{E}$  электромагнитной волны, распространяющейся в волноводе, имеют продольную составляющую, направленную вдоль продольной оси волновода. Индексы  $m$  и  $n$  указывают, соответственно, число полуволновых вариаций величин векторов  $\vec{H}$  и  $\vec{E}$  вдоль полуокружности и вдоль радиуса поперечного кругового сечения волновода. Индексы  $m$  и  $n$  для волн типа  $H_{mn}$  и  $E_{mn}$  могут принимать значения:  $m=0,1,2,3\dots$  и  $n=1,2,3\dots$  Придавая индексам  $m$  и  $n$  конкретные значения,

получают различные виды электромагнитных колебаний типа  $H_{mn}$  и  $E_{mn}$ , например волны вида  $H_{11}, E_{01}$  и т. д.

Для создания в цилиндрическом полом металлическом волноводе электромагнитных волн типа  $H_{mn}$  или  $E_{mn}$  внутрь волновода помещают, так называемые, устройства возбуждения электромагнитных волн. Эти устройства имеют особую конструкцию для конкретного типа электромагнитной волны и представляют собой передающую антенну того или иного вида. Если в этой передающей антенне генератор создаёт электрический ток, изменяющийся во времени по гармоническому закону с частотой  $f$ , то такая антенна, находясь не внутри волновода, а в однородной среде с электромагнитными характеристиками  $\mathcal{E}$  и  $\mu$ , может создать гармоническую электромагнитную волну  $\lambda$ , связанную с частотой  $f$ , называемой иногда рабочей частотой генератора, соотношением Релея вида (3.3).

Волны типа  $H_{mn}$  или  $E_{mn}$ , после отражения от оснований и боковых стенок цилиндра, создают в нём режим стоячих электромагнитных волн, при котором имеет место колебание электромагнитной энергии. Частоту  $f_{рез}$  колебаний электромагнитной энергии в резонаторе называют собственной резонансной частотой резонатора. Эта частота обязательно зависит от диаметра оснований и длины цилиндра, образующего резонатор, а также от вида электромагнитной волны возбуждённой в цилиндрическом полом металлическом волноводе, из которого изготовлен цилиндрический объёмный резонатор.

Для каждого вида электромагнитных волн, возбуждённых в цилиндрическом полом металлическом волноводе, можно подобрать такую длину цилиндра, что собственная резонансная частота резонатора  $f_{рез}$  совпадёт с рабочей частотой  $f$  генератора, возбуждающего электромагнитное поле в резонаторе, либо будет кратна  $f$ . При этом наступит явление резонанса либо на

основной частоте  $f$ , либо на её гармониках. Чтобы наступило явление резонанса, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись условия:

$$f_{рез} = K \cdot f \quad (3.10)$$

или

$$f_{рез} = f / K, \quad (3.11)$$

где  $K=1,2,3$  и т.д.

Электромагнитные волны могут распространяться внутри металлического волновода только в том случае, если длина  $\lambda$  электромагнитной волны, определяемая соотношением (3.3) и называемая иногда рабочей длиной волны генератора, будет меньше некоторой величины  $\lambda_{кр}^{max}$ , называемой максимальной критической длиной волны в волноводе. В цилиндрическом полом металлическом волноводе максимальную критическую длину имеет волна вида  $H_{11}$ . Она определяется соотношением:

$$\lambda_{кр}^{max} = \lambda_{кр}^{H_{11}} = \frac{2\pi \cdot a}{\mu_{11}} = \frac{2\pi \cdot a}{1,841} = 3,41 \cdot a, \quad (3.12)$$

где  $a$  — это длина радиуса цилиндрического резонатора, а  $\mu_{11}=1,841$  — это первый корень (нуль) производной функции Бесселя (цилиндрической) первого рода первого порядка; функции, с помощью которой аналитически описывают распределение электромагнитного поля в цилиндрическом полом металлическом волноводе. Волну вида  $H_{11}$  называют основной волной полого металлического цилиндрического волновода.

Итак, чтобы электромагнитная волна могла распространяться внутри полого, металлического цилиндрического волновода, необходимо чтобы длина волны генератора была меньше критической волны заданного типа колебаний. Но при соблюдении этого требования внутри полого, металлического цилиндрического волновода может распространяться не только основная

волна вида  $H_{11}$ , но и другие (не основные) волны. Несмотря на то, что система возбуждения электромагнитных волн в данной лабораторной установке позволяет создавать в цилиндрическом волноводе только основную волну вида  $H_{11}$ , при отражении ее от различных неоднородностей, находящихся внутри волновода (например, от зондов, являющихся возбудителями и индикаторами электромагнитных волн), могут появляться не основные волны различных видов, например  $E_{01}$  и другие.

Для того, чтобы внутри полого металлического цилиндрического волновода распространялась только основная волна вида  $H_{11}$  необходимо и достаточно, чтобы рабочая длина волны  $\lambda$  генератора была меньше критической длины волны этого колебания, но больше критической длины волны ближайшего высшего типа колебаний  $E_{01}$ , которая равна  $2.615 a$ .

Основная волна, распространяющаяся внутри полого металлического цилиндрического волновода, после отражения от оснований и боковых стенок резонатора в виде цилиндра, создаёт в нём режим стоячих электромагнитных волн, при котором появляются колебания электромагнитного поля типа  $H_{11p}$ , причём индекс  $p$  показывает, сколько полуволновых вариаций величин векторов электромагнитного поля наблюдается вдоль длины  $l$  резонатора. Так как в лабораторной работе предполагается исследование структуры колебания электромагнитного поля вида  $H_{111}$ , то индекс  $p$  следует выбрать равным единице.

Для колебания электромагнитного поля вида  $H_{111}$  собственная резонансная частота резонатора  $f_{рез}^{H_{111}}$  определяется соотношением:

$$f_{рез}^{H_{111}} = \frac{c}{2\pi \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1,841}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2}. \quad (3.13)$$

Из соотношения (3.13) следует, что длина  $l$  резонатора связана с резонансной частотой  $f_{рез}^{H_{111}}$  зависимостью:

$$l = \frac{\pi}{\sqrt{\left(\frac{2\pi \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}{c} \cdot f_{рез}^{H_{111}}\right)^2 - \left(\frac{1,841}{a}\right)^2}}. \quad (3.14)$$

Из соотношения (3.14) следует, что, задаваясь значением  $f_{рез}^{H_{111}}$  и зная величину  $a$  радиуса резонатора, можно найти длину  $l$  резонатора. Значение  $f_{рез}^{H_{111}}$  выбирается, исходя из того, что резонанс необходимо получить на рабочей частоте  $f$  генератора, либо на частотах  $kf$ ,  $f/k$ , где  $K=1,2,3,\dots$

Величину  $f$  рабочей частоты генератора необходимо выбирать из условия, обеспечивающего существование в волноводе только основной волны вида  $H_{11}$ .

### Описание лабораторной установки

Структурная схема установки показана рис.3.4. В состав установки входят: генератор электромагнитной энергии 1; цилиндрический объёмный резонатор 2; индикатор 3 с детектором 4. Цилиндрический объёмный резонатор 2 имеет в своём составе: зонды 5 и 6 для исследования изменений величин векторов электромагнитного поля вдоль полуокружности и вдоль длины цилиндра, соответственно; устройство 7 для возбуждения электромагнитных колебаний типа  $H_{11p}$  в резонаторе; металлический поршень 8, выполняющий роль подвижного основания цилиндра; механизмы 9, 10 и 11 обеспечи-

вающие перемещения зондов 5, 6 и поршня 8, соответственно. Детектор 4 можно последовательно подключать к зондам 5 и 6.

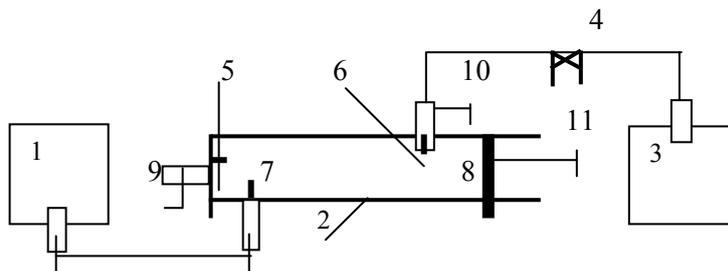


Рис. 3.4

Объёмный резонатор 2 представляет собой полый цилиндр, внутри которого находится подвижный металлический поршень 8 - подвижное основание цилиндра. Перемещение поршня изменяет длину  $l$  объёмного резонатора и обеспечивает настройку резонатора в резонанс с рабочей частотой  $f$  генератора. Измерение числа  $p$  полуволновых вариаций электромагнитного поля вдоль оси резонатора производится перемещением зонда 6 вдоль оси резонатора, а измерение числа  $m$  полуволновых вариаций поля вдоль полуокружности основания резонатора производится перемещением зонда 5 вдоль полуокружности основания резонатора. Возбудитель 7 выполнен в виде штыря и позволяет создавать в резонаторе только колебания типа  $H_{11p}$ . Величина  $a$  радиуса основания цилиндра равна 7,5 см, а наибольшая конструктивная длина  $l_{\max}$  цилиндра равна 10 см.

### Порядок выполнения работы

1. Включить генератор 1 и настроить его на частоту  $f$ , заданную преподавателем. При этом в волноводе будет возбуждена основная волна вида  $H_{11}$ .
2. Проверить, можно ли настроить резонатор на частоту  $f_{рез}^{H_{11}} = f$ . Для этого из соотношения (3.14), при  $f_{рез}^{H_{11}} = f$ , найти длину  $l$  резонатора, обеспечивающую резонанс на частоте  $f$ . Если рассчитанная длина  $l$  резонатора окажется больше конструктивной длины  $l_{\max}$  резонатора, то настроить резо-

натор на частоту  $f_{рез}^{H_{111}} = f$  невозможно и необходимо перестроить резонатор на другую частоту  $f_{рез}^{H_{111}}$ , при которой длина  $l$  резонатора окажется меньше конструктивной длины  $l_{max}$  резонатора.

3. Из соотношения (3.14) следует, что длина  $l$  резонатора уменьшается при возрастании  $f_{рез}^{H_{111}}$ . Полагаем  $f_{рез}^{H_{111}} = 2f$  и из соотношения (3.14), находим новую величину  $l$  длины резонатора. Если окажется, что новая величина  $l$  длины резонатора опять больше конструктивной длины  $l_{max}$  резонатора, то необходимо перестроить резонатор на частоту  $f_{рез}^{H_{111}} = 3f$ , определив из соотношения (3.14), при  $f_{рез}^{H_{111}} = 3f$ , новую величину  $l$  длины резонатора. Таким образом, необходимо действовать до тех пор, пока  $l$  не окажется меньше  $l_{max}$ .

4. Установить найденное значение длины и исследовать структуру возбужденного в резонаторе колебания вида  $H_{111}$ , подключая последовательно индикатор 3 с детектором 4 к зондам 5 и 6 и снимая зависимость показаний по шкале индикатора 3 от положения соответствующего зонда. Данные измерений занести в таблицы и построить графики полученных зависимостей.

### Содержание отчёта

- Структурная схема лабораторной установки.
- Результаты измерений и расчётов по п.1-4.
- Краткие выводы по результатам работы.

### Вопросы для самопроверки.

1. Для чего применяются объёмные резонаторы?
2. Как образуются колебания в объёмном резонаторе?
3. Какие типы колебаний возникают в полых цилиндрических объёмных резонаторах?

4. Какова структура основного колебания в цилиндрическом объёмном резонаторе?

5. Как выбирают длину объёмного резонатора для обеспечения условия резонанса?

6. Как выбирают рабочую частоту генератора для возбуждения в резонаторе конкретного вида колебаний?

Литература: [3] с.273-279;289-292.

### **3.6.4. Исследование области пространства, оказывающей существенное влияние на распространение радиоволн в однородной среде**

#### **Цель работы**

Исследование формы и определение размеров пространственных зон Френеля при распространении радиоволн в однородной среде.

#### **Основные теоретические положения**

При рассмотрении многих практических задач электродинамики, связанных с исследованием особенностей распространения радиоволн, в первом приближении, можно считать, что радиоволны распространяются в однородной среде.

Как показывают исследования, не все области однородной среды, оказывают одинаковое влияние на радиоволны, распространяющиеся из точки излучения (где находится передающая антенна) в точку наблюдения (где находится приёмная антенна). Влияние различных областей однородной среды на распространение радиоволн удобно учитывать с помощью пространственных зон Френеля, позволяющих установить размеры области однородной среды, оказывающей существенное влияние на распространение радиоволн. Следует иметь в виду, что пространственные зоны Френеля это, конечно, условные, реально не существующие области в однородной среде, понятия о которых вводят для удобства физико-математического описания и анализа процесса распространения радиоволн в однородной среде.

Определим форму и размеры пространственных зон Френеля в однородной среде. Для этого проведём через точки излучения  $O$  и наблюдения  $N$

прямую  $p$  (рис. 3.5). Через прямую  $p$  проведём произвольную плоскость  $S$ . Примем расстояние между точками излучения  $O$  и наблюдения  $N$  равным  $R$ . Длина  $|ON|$  отрезка  $[ON]$  тоже равна  $R$ . Выберем на отрезке  $[ON]$  точку  $C$ , которая будет делить отрезок  $[ON]$  пополам, следовательно, длины  $|OC|$  и  $|CN|$  отрезков  $[OC]$  и  $[CN]$  будут равны  $R/2$ . Проведём в плоскости  $S$  через точку  $C$  прямую  $q$ , перпендикулярную отрезку  $[ON]$ . Будем считать, что длина радиоволны, распространяющейся из точки излучения  $O$  в точку наблюдения  $N$ , равна  $\lambda$ .

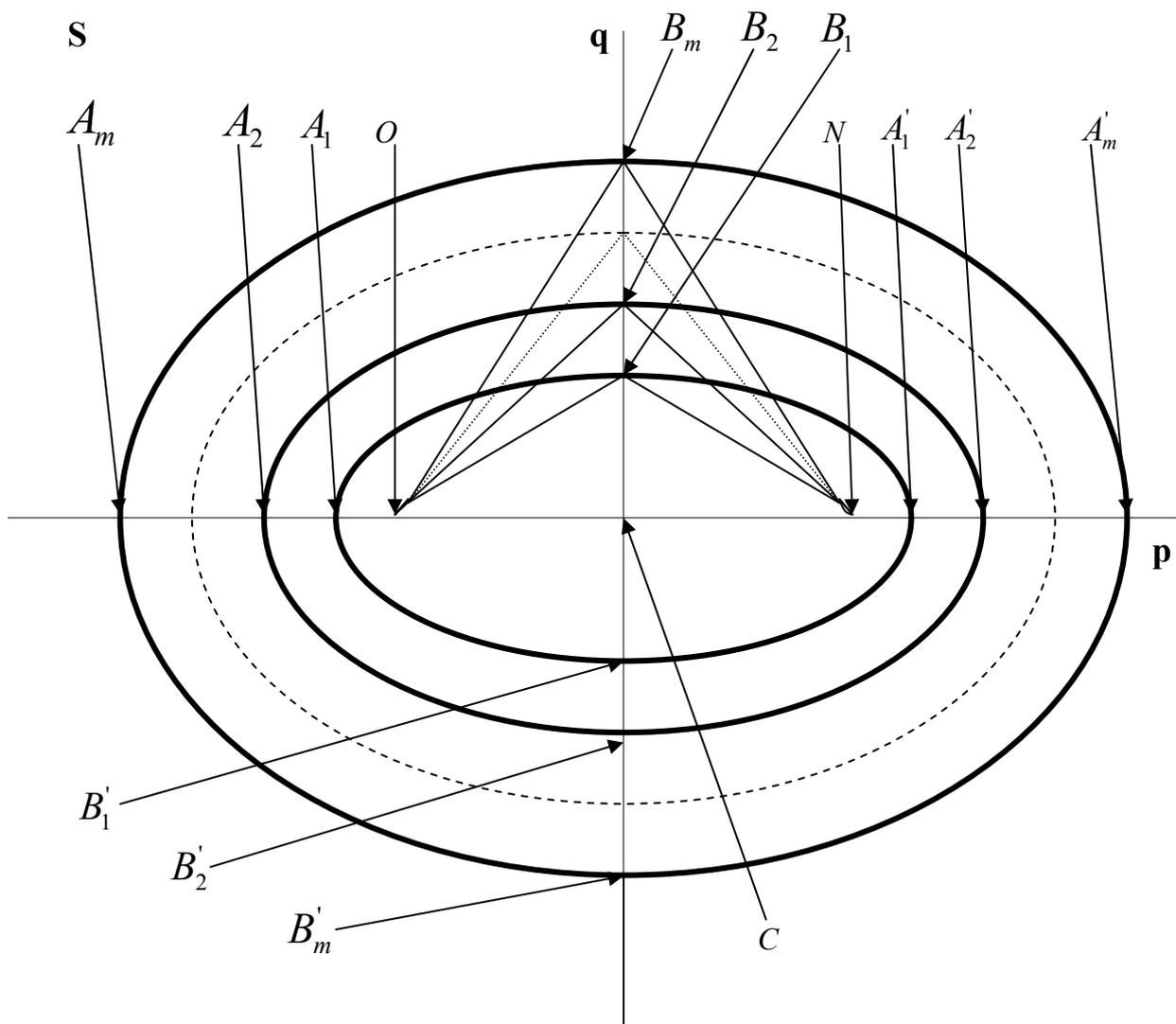


Рис.3.5

Найдём форму и размер внешней границы первой пространственной

зоны Френеля, для этого выберем на прямой  $q$  точку  $B_1$  (рис.3.5) так, чтобы выполнялось условие Френеля вида:

$$\left| B_1 O \right| + \left| B_1 N \right| = R + \lambda / 2, \quad (3.15)$$

т.е. чтобы сумма расстояний  $\left| B_1 O \right|$  и  $\left| B_1 N \right|$  от выбранной точки  $B_1$  до точек  $O$  и  $N$  была бы больше расстояния  $R$  на величину  $\lambda / 2$ .

Теперь будем искать такие точки на плоскости  $S$ , которые, как и точка  $B_1$ , будут удовлетворять условию: сумма расстояний каждой такой искомой точки от двух заданных точек  $O$  и  $N$  есть величина постоянная и равная,

$(R + \lambda / 2)$ . Из курса математики известно, что множество точек, удовлетворяющих указанному условию, есть эллипс. На рис.3.5 это эллипс  $[A_1 B_1 A_1' B_1' A_1]$ , у которого:  $[A_1 A_1']$  – большая ось;  $[B_1 B_1']$  – малая ось;  $A_1, A_1', B_1, B_1'$  – вершины;  $C$  – центр;  $O$  и  $N$  – фокусы.

Точка  $C$  делит большую и малую оси эллипса пополам. Обозначим через  $a_1$  длину  $\left| A_1 C \right|$  большой полуоси  $[A_1 C]$ ; следовательно, и длина  $\left| C A_1' \right|$  большой полуоси  $[C A_1']$  тоже равна  $a_1$ . Примем длину  $\left| B_1 C \right|$  малой полуоси  $[B_1 C]$  равной  $b_1$ , следовательно, и длина  $\left| C B_1' \right|$  малой полуоси  $[C B_1']$  тоже равна  $b_1$ .

Из курса математики известно, что, в соответствии с фокальными свойствами эллипса (в соответствии с определением эллипса), сумма расстояний от любой точки образующей эллипса (например, от точки  $B_1$ ) до фокальных точек есть величина постоянная. Следовательно, в точке  $B_1$  эллипса, для которой справедливо равенство (3.15), можем записать, в соответствии с фокальным свойством эллипса, следующее соотношение:

$$|B_1O| + |B_1N| = R + \frac{\lambda}{2} = 2a_1, \quad (3.16)$$

откуда получаем выражение для длины  $a_1$  большой полуоси эллипса в виде:

$$a_1 = \frac{1}{2} \left( R + \frac{\lambda}{2} \right), \quad (3.17)$$

где  $R$  и  $\lambda$  - известные (заданные) величины.

Из рис.3.5 следует, что точка  $B_1$  расположена на одинаковом расстоянии от точек  $O$  и  $N$ , а потому справедливо равенство:

$$|B_1O| = |B_1N|, \quad (3.18)$$

следовательно, учитывая (3.16) и (3.17), получаем:

$$|B_1O| = |B_1N| = a_1 = \frac{1}{2} \left( R + \frac{\lambda}{2} \right). \quad (3.19)$$

Учитывая соотношение (3.19), получаем из прямоугольного треугольника  $\Delta B_1OC$  (рис.3.5) для длины  $b_1$  малой полуоси  $[B_1C]$  следующее выражение:

$$b_1 = \sqrt{a_1^2 - \left(\frac{R}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \left(R + \frac{\lambda}{2}\right)^2 - \left(\frac{R}{2}\right)^2} = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda \left(R + \frac{\lambda}{4}\right)}, \quad (3.20)$$

где учтено, что  $|OC| = \frac{R}{2}$ .

Теперь повернём эллипс  $[A_1A_1' A_1A_1' A_1A_1']$  вокруг его большой оси  $[A_1A_1']$  на  $180^\circ$  и получим поверхность второго порядка в виде эллипсоида вращения. Множество точек однородной среды, находящихся на поверхности этого эллипсоида, образует внешнюю границу первой пространственной зоны Френеля, а множество точек однородной среды, находящихся внутри и на поверхности этого эллипсоида, образует геометрическое тело, называемое первой пространственной зоной Френеля.

Найдём теперь форму и размер внешней границы второй пространственной зоны Френеля, для этого выберем на прямой  $\mathbf{q}$  (рис. 3.5) точку  $B_2$  так, чтобы выполнялось условие Френеля вида:

$$|B_2O| + |B_2N| = R + 2\frac{\lambda}{2}, \quad (3.21)$$

т.е. чтобы сумма расстояний  $|B_2O|$  и  $|B_2N|$  от выбранной точки  $B_2$  до точек  $O$  и  $N$  была бы больше расстояния  $R$  на величину  $\left(2\frac{\lambda}{2}\right)$ .

Если теперь найти на плоскости  $\mathbf{S}$  (рис.3.5) такие точки, которые, как и точка  $B_2$ , будут удовлетворять условию: сумма расстояний от каждой такой точки до двух заданных точек  $O$  и  $N$  есть величина постоянная и равная  $\left(R + 2\frac{\lambda}{2}\right)$ , то можно построить эллипс  $[A_2B_2A'_2B'_2A_2]$  с большой осью  $[A_2A'_2]$  и малой осью  $[B_2B'_2]$ . Для эллипса  $[A_2B_2A'_2B'_2A_2]$  можно записать соотношение вида:

$$|B_2O| + |B_2N| = R + 2\frac{\lambda}{2} = 2a_2, \quad (3.22)$$

где  $a_2 = |A_2C| = |CA'_2|$  - длина большой полуоси  $[A_2C]$  или  $[CA'_2]$  эллипса  $[A_2B_2A'_2B'_2A_2]$ .

Из соотношения (3.22) получаем следующее выражение для длины  $a_2$ :

$$a_2 = \frac{1}{2} \left( R + 2\frac{\lambda}{2} \right). \quad (3.23)$$

Учитывая, что точка  $B_2$  (рис.3.5) расположена на одинаковом расстоянии от точек  $O$  и  $N$ , получаем следующее соотношение:

$$|B_2O| = |B_2N| = \frac{1}{2} \left( R + 2 \frac{\lambda}{2} \right) = a_2, \quad (3.24)$$

которое позволяет получить из прямоугольного треугольника  $\Delta B_2OC$  (рис.3.5) следующее выражение для длины  $b_2 = |B_2C| = |B'_2C|$  малой полуоси  $[B_2C]$  или  $[B'_2C]$ :

$$b_2 = \sqrt{a_2^2 - \left(\frac{R}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \left( R + 2 \frac{\lambda}{2} \right)^2 - \frac{R^2}{4}} = \frac{1}{2} \sqrt{2\lambda \left( R + 2 \frac{\lambda}{4} \right)}, \quad (3.25)$$

где учтено, что  $|OC| = \frac{R}{2}$ .

Теперь повернём эллипс  $[A_2B_2A'_2B'_2A_2]$  вокруг его большой оси  $[A_2A'_2]$  на  $180^\circ$  и получим поверхность второго порядка в виде эллипсоида вращения. Множество точек однородной среды, находящихся на поверхности этого эллипсоида, образует внешнюю границу второй пространственной зоны Френеля, а множество точек однородной среды, находящихся на поверхности этого эллипсоида и между внешними границами первой и второй пространственных зон Френеля, образует геометрическое тело, называемое второй пространственной зоной Френеля.

Действуя аналогично тому, как мы действовали, получая первую пространственную зону Френеля и две первые пространственные зоны Френеля, мы можем выбрать на прямой  $q$  точку  $B_m$  (рис.3.5) так, чтобы выполнялось условие:

$$|B_mO| + |B_mN| = R + m \frac{\lambda}{2}, \quad (3.26)$$

т.е. чтобы сумма расстояний  $|B_mO|$  и  $|B_mN|$  от выбранной точки  $B_m$  до то-

чек О и N была бы больше расстояния R на величину  $m \frac{\lambda}{2}$ .

Далее, действуя аналогично тому, как мы действовали для случая выбора точек  $B_1$  и  $B_2$  на прямой  $q$  (рис.3.5), мы можем получить, выбрав точку  $B_m$  на прямой  $q$ , следующее выражение для длин  $a_m$  и  $b_m$  большой и малой полуосей эллипса  $[A_m B_m A'_m B'_m A_m]$ :

$$a_m = \frac{1}{2} \left( R + m \frac{\lambda}{2} \right), \quad (3.27)$$

$$b_m = \sqrt{a_m^2 - \left( \frac{R}{2} \right)^2} = \frac{1}{2} \sqrt{m\lambda \left( R + m \frac{\lambda}{4} \right)}, \quad (3.28)$$

где  $m = \{1;2;3;\dots\}$  - натуральное число.

Теперь повернём эллипс  $[A_m B_m A'_m B'_m A_m]$  вокруг его большой оси  $[A_m A'_m]$  на  $180^\circ$  и получим поверхность второго порядка в виде эллипсоида вращения. Множество точек однородной среды, находящихся на поверхности этого эллипсоида, образует внешнюю границу  $m$ -ой пространственной зоны Френеля, а множество точек однородной среды, находящихся на поверхности этого эллипсоида и между внешними границами  $(m-1)$ -й и  $m$ -й пространственными зонами Френеля, образует геометрическое тело, называемое  $m$ -й пространственной зоной Френеля.

Введение понятия пространственных зон Френеля имеет практическое значение. Так, если сконструировать техническое устройство, которое позволит регулировать размеры области, в пределах которой радиоволна распространяется из точки излучения О в точку наблюдения N, и с его помощью ограничивать размеры этой области только одной первой пространственной зоной Френеля (либо какой-то частью первой зоны), двумя первыми зонами

(либо какой-то частью двух первых зон) и т.д., то величина  $E$  вектора напряжённости электромагнитного поля в точке наблюдения N будет изменяться так, как представлено на рис. 3.6. Величина  $n$  на рис. 3.6 равна либо нулю, либо любому положительному действительному числу и показывает, сколько зон Френеля участвует в процессе

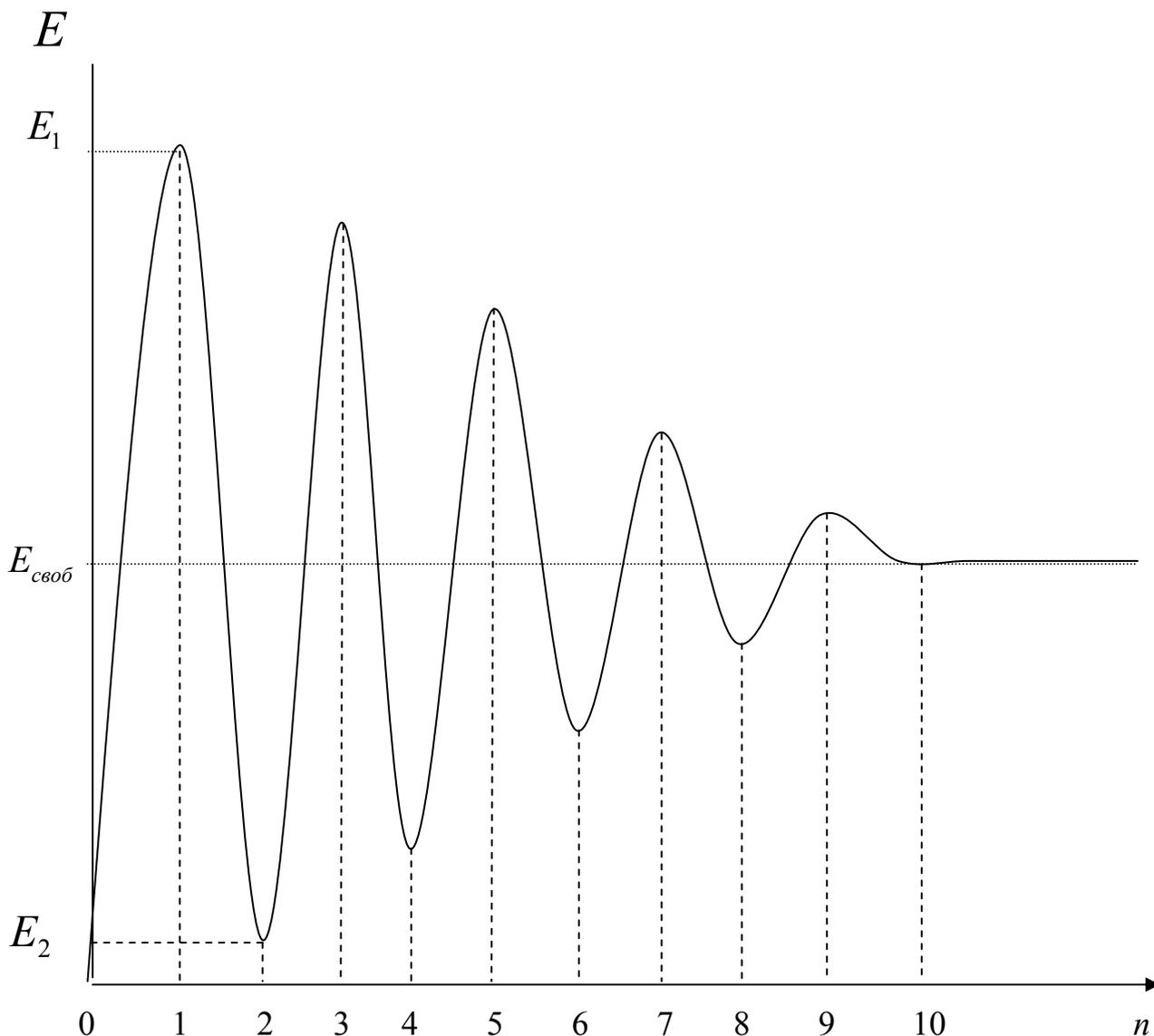


Рис. 3.6

распространения радиоволн. Например, если  $n = 0$  и при этом  $E = 0$ , то это значит, что в процессе распространения радиоволн из точки O в точку N не участвует ни одна зона Френеля, т.е. между точками O и N невозможен процесс распространения радиоволн; если  $n = 0.5$ , то в процессе распростра-

нения радиоволн из точки О в точку N участвует половина объёма первой зоны Френеля; если  $n = 1.5$ , то в процессе распространения радиоволн из точки О в точку N участвует первая зона Френеля и половина объёма второй зоны Френеля и т.д.

Из рис. 3.6 следует, что если, с помощью сконструированного технического устройства, обеспечить распространение радиоволн из точки О в точку N только в пределах одной первой пространственной зоны Френеля при  $n = 1$ , то величина  $E_1$  вектора напряжённости электромагнитного поля в точке наблюдения N будет максимальной. Если, с помощью сконструированного технического устройства, обеспечить распространение радиоволн из точки О в точку N в пределах двух первых пространственных зон Френеля при  $n = 2$ , то величина  $E_2$  вектора напряжённости электромагнитного поля в точке наблюдения N будет минимальной. Амплитуды осцилляций вектора напряжённости электрического поля в точке наблюдения N будут уменьшаться при включении в процесс распространения радиоволн всё большего числа зон Френеля. Наконец, когда количество пространственных зон Френеля, обеспечивающих распространение радиоволн из точки О в точку N, составит  $n \geq 10$ , величина  $E$  вектора напряжённости электромагнитного поля в точке наблюдения N достигнет значения  $\approx \frac{E_1}{2}$ , причём это будет равно тому значению  $E_{своб}$  величины вектора напряжённости, которое наблюдалось бы в точке N, если бы распространение радиоволн происходило в однородной среде. Область однородной среды, ограниченную примерно десятью ( $n = 10$ ) первыми пространственными зонами Френеля, называют максимальной областью, существенной для распространения радиоволн в однородной среде.

Можно показать, что величина  $E$  вектора напряжённости электромагнитного поля в точке наблюдения N также достигает значения  $E_1/2$  (рис.3.6), если величина малой полуоси пространственного эллипсоида вращения будет

равна  $\frac{b_1}{\sqrt{2}}$ . При этом объём эллипсоида вращения с величиной малой полуоси равной  $\frac{b_1}{\sqrt{2}}$  и величиной его большой полуоси равной  $a_1$ , составит половину объёма первой пространственной зоны Френеля. Область пространства, занимаемую эллипсоидом вращения с величиной малой полуоси равной  $\frac{b_1}{\sqrt{2}}$  и величиной большой полуоси равной  $a_1$ , называют минимальной областью, существенной для распространения радиоволн в однородной среде.

### Описание лабораторной установки

Структурная схема установки показана на рис. 3.7. В состав установки входят: генератор электромагнитной энергии 1, неподвижная передающая антенна 2, металлический экран 3 с ирисовой диафрагмой, устройство 4 для перемещения металлического экрана 3, приёмная антенна 5, волноводная

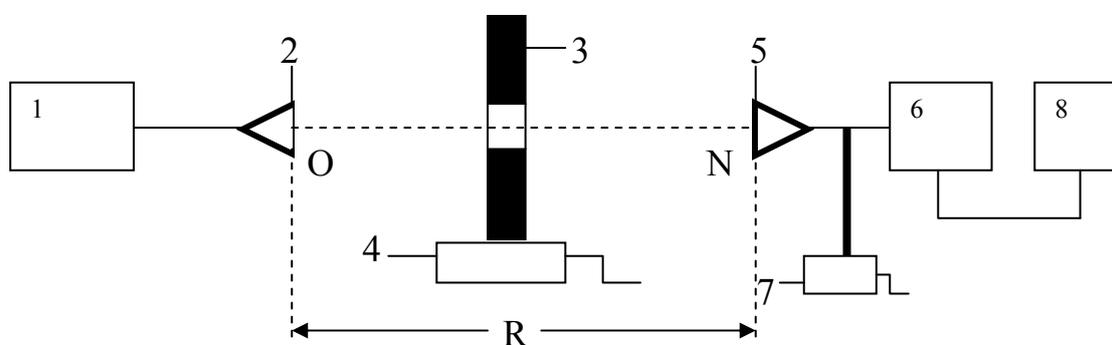


Рис. 3.7

детекторная секция 6, устройство 7 для перемещения приёмной антенны 5 и детекторной секции 6, индикатор 8.

Ирисовая диафрагма позволяет регулировать диаметр отверстия в металлическом экране 3. Антеннами 2 и 5 являются открытые концы волноводов, имеющие размеры  $a$  и  $b$  широкой и узкой стенок поперечного сечения.

### Порядок выполнения работы

1. Включить генератор 1 и настроить его на частоту  $f$  по заданию преподавателя.
2. При отсутствии металлического экрана 3 между антеннами 2 и 5, установить, перемещая антенну 5, расстояние  $R$  между антеннами, удовлетворяющее условию  $R \gg \lambda$ , учитывая, что длина  $\lambda$  электромагнитной волны, распространяющейся между антеннами 2 и 5, связана с частотой  $f$ , установленной в п 1, соотношением:  $\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon\mu}}$ . Сориентировать антенну 5 напротив антенны 2. Записать значение  $R$  величины установленного расстояния между антеннами 2 и 5.
3. Небольшими изменениями ориентации антенны 5 и настройкой детекторной секции 6 добиться максимальных показаний индикатора 8. Установить максимальные показания в пределах примерно 1/3 шкалы индикатора 8.
4. Установить металлический экран 3 с максимально закрытым отверстием диафрагмы посередине между антеннами 2 и 5.
5. Постепенно увеличивая диаметр отверстия в диафрагме, следить за показаниями индикатора, записывая значения показаний индикатора и соответствующие им значения диаметра  $d$  отверстия в диафрагме. Полученные данные занести в таблицу и построить график зависимости  $E = f(d)$ .
6. Записать те значения диаметра  $d$  отверстия в диафрагме, при которых функция  $E = f(d)$  имеет экстремальные значения, и по этим значениям определить величины малых полуосей внешних границ соответствующих зон Френеля. Записать количество экстремальных значений функции  $E = f(d)$ .
7. Учитывая значение длины  $\lambda$  электромагнитной волны, распространяющейся между антеннами 2 и 5, полученное в п.2, рассчитать, с помощью соотношений (3.27) и (3.28), значения величин большой и малой полуосей

внешних границ зон Френеля, при экстремальных значениях принятого сигнала. Сравнить соответствующие значения величин малых полуосей, полученные в п.6 и п.7.

### **Содержание отчёта**

- Структурная схема лабораторной установки.
- Результаты измерений и расчётов по п.1 - 7.
- Краткие выводы по результатам работы.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Как определить положение и форму пространственных зон Френеля при распространении радиоволн в однородной среде?
2. Какова цель введения понятия о пространственных зонах Френеля?
3. Как объяснить осцилляции значений напряжённости электромагнитного поля в точке наблюдения с помощью понятия зон Френеля?
4. Каковы размеры максимальной и минимальной областей, существенных при распространении радиоволн в свободном пространстве?

Литература: [2], с. 12- 15.

### **3.6.5. Исследование отражения и преломления плоских электромагнитных волн на плоской границе раздела двух однородных диэлектрических сред**

#### **Цель работы**

Изучение явлений, возникающих при падении плоских электромагнитных волн на плоскую границу раздела двух однородных диэлектрических сред.

#### **Основные теоретические положения**

Для изучения явлений, возникающих при падении плоских электромагнитных волн на плоскую границу раздела двух однородных диэлектрических сред рассмотрим гипотетическую (воображаемую) электродинамическую задачу, содержание и решение которой позволит создать физико-математическую модель реальной физической задачи, связанной с процессами отражения и пре-

ломления, возникающими при падении электромагнитных волн на границу раздела двух сред.

Сформулируем содержание и выполним решение указанной гипотетической электродинамической задачи. Предположим, что бесконечное пространство заполнено бесконечной диэлектрической средой. Разделим эту диэлектрическую среду бесконечной плоскостью на две части. Предположим, что одна часть бесконечной диэлектрической среды, которую будем называть первой средой, обладает следующими электромагнитными параметрами:  $\epsilon_1 = \text{const}$  - относительная диэлектрическая проницаемость первой среды;  $\mu_1 = 1$  - относительная магнитная проницаемость первой среды;  $\gamma_1 = 0$  - удельная проводимость первой среды. Предположим также, что первая среда является однородной, линейной, недиспергирующей, изотропной средой.

Далее предположим, что другая часть бесконечной диэлектрической среды, которую будем называть второй средой, обладает следующими электромагнитными параметрами:  $\epsilon_2 = \text{const}$  - относительная диэлектрическая проницаемость второй среды;  $\mu_2 = 1$  - относительная магнитная проницаемость второй среды;  $\gamma_2 = 0$  - удельная проводимость второй среды. Предположим также, что вторая среда является однородной, линейной, недиспергирующей, изотропной средой.

Бесконечную плоскость, разделяющую первую и вторую диэлектрические среды, назовём границей раздела сред. Предположим, что в первой диэлектрической среде распространяется электромагнитная волна, которая, распространяясь, подходит к границе раздела сред, или, как говорят, “падает” на границу раздела сред. При “падении” электромагнитной волны на границу раздела сред с различными электромагнитными характеристиками наблюдаются явления отражения и преломления этой падающей электромагнитной волны. В первой среде, в результате явления отражения падающей электромагнитной волны, появляется отражённая электромагнитная волна, а во второй среде, в результате явления преломления падающей электромагнитной волны, появляется преломлённая электромагнитная волна. Таким образом, считают, что в первой

среде существуют падающая и отражённая электромагнитные волны, а во второй среде существует преломлённая электромагнитная волна.

При решении указанной электродинамической задачи необходимо найти соотношения, связывающие между собой величины углов падения  $\varphi_{пад}$ , отражения  $\varphi_{отр}$  и преломления  $\varphi_{прел}$ , а также найти векторы электромагнитного поля отражённой и преломлённой волн, полагая, что известны электромагнитные параметры первой и второй сред, известна величина  $\varphi_{пад}$  угла падения, а также известны векторы электромагнитного поля падающей электромагнитной волны.

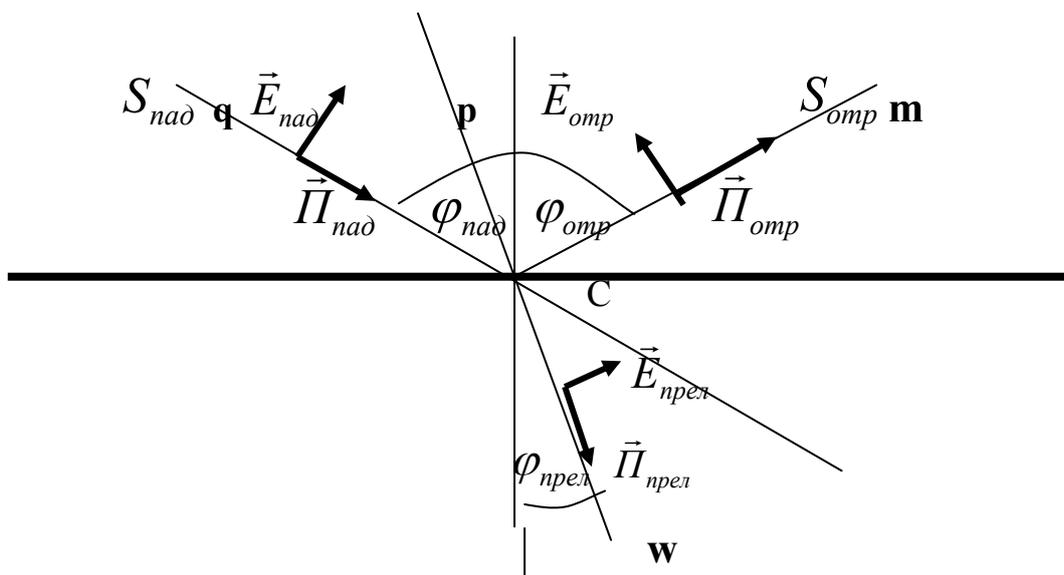
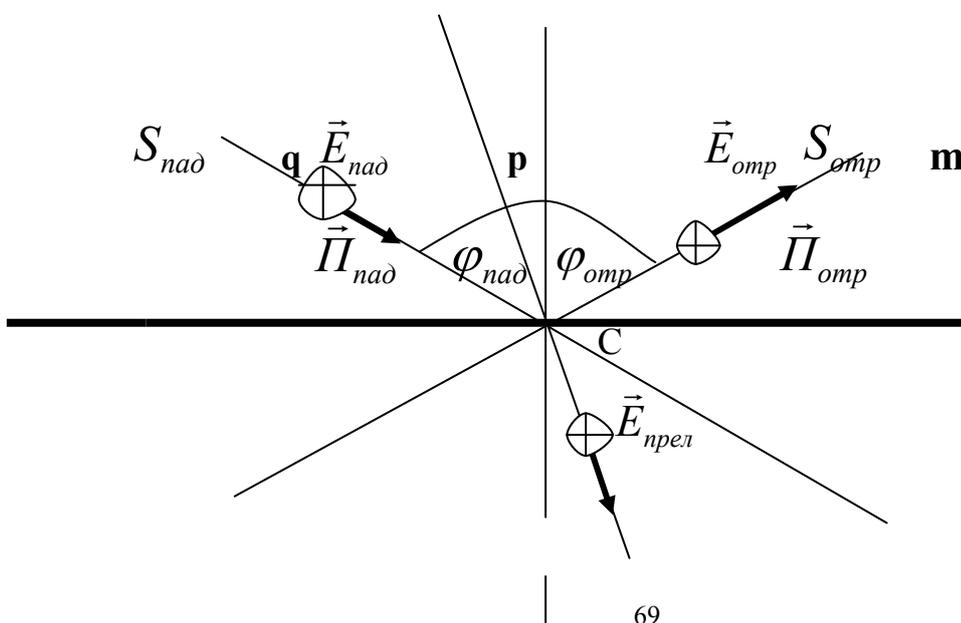


Рис. 3.8



$$\underbrace{\varphi_{\text{прел}}}_{\text{W}} \vec{\Pi}_{\text{прел}}$$

Рис. 3.9

Решим указанную гипотетическую электродинамическую задачу. Учитывая известные электромагнитные параметры первой среды, можно утверждать, что электромагнитная волна распространяется в первой среде прямолинейно. Мы предположили, что распространяющаяся в первой среде электромагнитная волна “падает” на плоскую границу раздела сред. Направление распространения падающей электромагнитной волны с известными векторами  $\vec{E}_{\text{пад}}$  и  $\vec{H}_{\text{пад}}$  совпадает с направлением вектора Пойнтинга  $\vec{\Pi}_{\text{пад}} = \vec{E}_{\text{пад}} \times \vec{H}_{\text{пад}}$  падающей электромагнитной волны. Предположим, что распространяющаяся в первой среде электромагнитная волна “падает” на плоскость раздела сред в точку С (рис.3.8), отражается и преломляется в этой точке; точку С называют точкой отражения, и преломления электромагнитной волны на границе раздела сред. Проведём через точку С прямую **р**, расположив её перпендикулярно плоскости, являющейся границей раздела сред. Проведём через точку С прямую **q**, расположив её так, что на этой прямой располагается вектор Пойнтинга  $\vec{\Pi}_{\text{пад}}$  падающей электромагнитной волны. Угол между прямыми **р** и **q** назовём углом падения. Предположим, что величина угла падения задана и равна  $\varphi_{\text{пад}}$  (рис. 3.8). Проведём через прямые **р** и **q** плоскость  $S_{\text{пад}}$ , которую назовём плоскостью падения. Определим направления распространения отражённой электромагнитной волны в первой среде и преломлённой электромагнитной волны во второй среде. Для этого воспользуемся тремя законами нидерландского астронома и математика Снеллиуса (1580-1626 гг). Эти законы, применительно к рассматриваемой электродинамической задаче, можно сформулировать следующим образом: первый закон утверждает, что

векторы Пойнтинга падающей электромагнитной волны  $\vec{\Pi}_{над} = \vec{E}_{над} \times \vec{H}_{над}$ , отражённой электромагнитной волны  $\vec{\Pi}_{отр} = \vec{E}_{отр} \times \vec{H}_{отр}$  и преломлённой электромагнитной волны  $\vec{\Pi}_{прел} = \vec{E}_{прел} \times \vec{H}_{прел}$  лежат в одной плоскости; второй закон утверждает, что величина  $\varphi_{отр}$  угла отражения равна величине  $\varphi_{над}$  угла падения; третий закон утверждает, что произведение синуса угла преломления на показатель преломления второй среды равно произведению синуса угла падения на показатель преломления первой среды, т.е. третий закон Снеллиуса утверждает, что соблюдается равенство:

$$\sin \varphi_{прел} \bullet n_2 = \sin \varphi_{над} \bullet n_1, \quad (3.29)$$

где  $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$  - показатель преломления первой среды;  $n_2 = \sqrt{\epsilon_2}$  - показатель преломления второй среды;  $\varphi_{прел}$  - величина угла преломления.

Определим положение векторов Пойнтинга отражённой электромагнитной волны  $\vec{\Pi}_{отр} = \vec{E}_{отр} \times \vec{H}_{отр}$  и преломлённой электромагнитной волны  $\vec{\Pi}_{прел} = \vec{E}_{прел} \times \vec{H}_{прел}$ , учитывая законы Снеллиуса. В соответствии с первым законом Снеллиуса векторы  $\vec{\Pi}_{над}$ ,  $\vec{\Pi}_{отр}$  и  $\vec{\Pi}_{прел}$  должны находиться в одной плоскости. Причём вектор  $\vec{\Pi}_{отр}$  должен находиться в первой среде, а вектор  $\vec{\Pi}_{прел}$  должен находиться во второй среде. Определим теперь направление вектора  $\vec{\Pi}_{прел}$  во второй среде. Для этого проведём в плоскости падения  $S_{над}$  через точку преломления С прямую  $w$ , расположив её во второй среде справа от прямой  $p$  под углом преломления. Величина  $\varphi_{прел}$  должна быть равна:

$$\varphi_{\text{прел}} = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \varphi_{\text{пад}}\right). \quad (3.30)$$

Теперь, когда мы, используя законы Снеллиуса, определили искомую связь между величинами  $\varphi_{\text{пад}}$ ,  $\varphi_{\text{отр}}$  и  $\varphi_{\text{прел}}$ , установим связь между векторами электромагнитного поля падающей, отражённой и преломлённой электромагнитных волн. Предположим, что падающая, отражённая и преломлённая электромагнитные волны являются плоскими и гармоническими. В плоской гармонической электромагнитной волне вектор  $\vec{E}_{\text{пад}}$  должен быть перпендикулярен вектору  $\vec{\Pi}_{\text{пад}}$ , т.к.  $\vec{\Pi}_{\text{пад}} = \vec{E}_{\text{пад}} \times \vec{H}_{\text{пад}}$ , вектор  $\vec{E}_{\text{отр}}$  должен быть перпендикулярен вектору  $\vec{\Pi}_{\text{отр}}$ , т.к.  $\vec{\Pi}_{\text{отр}} = \vec{E}_{\text{отр}} \times \vec{H}_{\text{отр}}$ , а вектор  $\vec{E}_{\text{прел}}$  должен быть перпендикулярен вектору  $\vec{\Pi}_{\text{прел}}$ , так как  $\vec{\Pi}_{\text{прел}} = \vec{E}_{\text{прел}} \times \vec{H}_{\text{прел}}$ . Проведём через векторы  $\vec{E}_{\text{пад}}$  и  $\vec{\Pi}_{\text{пад}}$  плоскость, такую плоскость называют плоскостью поляризации падающей электромагнитной волны. Проведём через векторы  $\vec{E}_{\text{отр}}$  и  $\vec{\Pi}_{\text{отр}}$  плоскость, это будет плоскость поляризации отражённой электромагнитной волны. Проведём через векторы  $\vec{E}_{\text{прел}}$  и  $\vec{\Pi}_{\text{прел}}$  плоскость, это будет плоскость поляризации преломлённой электромагнитной волны.

В общем случае, плоскость поляризации падающей, отражённой и преломлённой электромагнитной волны может располагаться произвольно относительно плоскости падения  $S_{\text{пад}}$ . Они также могут изменять во времени своё положение относительно плоскости падения  $S_{\text{пад}}$ . При этом и векторы  $\vec{E}_{\text{пад}}$ ,  $\vec{E}_{\text{отр}}$  и  $\vec{E}_{\text{прел}}$  могут находиться вне плоскости падения  $S_{\text{пад}}$  и могут изменять во

времени своё расположение относительно плоскости падения  $S_{над}$ . Это является следствием того, что падающая, отражённая и преломлённая электромагнитные волны могут быть, в общем случае, поляризованы линейно, циркулярно или эллиптически.

Однако, известно, что любой вид поляризации электромагнитных волн можно получить в результате суперпозиции двух ортогонально расположенных в пространстве линейно поляризованных электромагнитных волн, поэтому целесообразно рассмотреть два случая отражения и преломления электромагнитных волн.

В первом случае будем полагать, что падающая электромагнитная волна поляризована линейно и вектор напряжённости  $\vec{E}_{над}$  этой волны расположен в плоскости падения  $S_{над}$ ; такую поляризацию падающей электромагнитной волны будем называть параллельной, т.к. вектор напряжённости  $\vec{E}_{над}$  этой волны можно считать параллельным плоскости падения  $S_{над}$ ; вектор напряжённости  $\vec{E}_{над}$  параллельно поляризованной падающей электромагнитной волны будем обозначать, как  $\vec{E}_{над}^{пар}$ . В первом случае будем полагать также, что отражённая и преломлённая электромагнитные волны тоже параллельно поляризованы, а векторы напряжённости  $\vec{E}_{отр}$  и  $\vec{E}_{прел}$  будем обозначать, как  $\vec{E}_{отр}^{пар}$  и  $\vec{E}_{прел}^{пар}$  (рис. 3.8).

Во втором случае будем полагать, что падающая электромагнитная волна также поляризована линейно, а вектор напряжённости  $\vec{E}_{над}$  этой волны расположен перпендикулярно плоскости падения  $S_{над}$ ; такую поляризацию падающей электромагнитной волны будем называть перпендикулярной; вектор

напряжённости  $\vec{E}_{над}$ , перпендикулярно поляризованной падающей электромагнитной волны, будем обозначать как  $\vec{E}_{над}^{пер}$ . Во втором случае будем полагать также, что отражённая и преломлённая электромагнитные волны тоже перпендикулярно поляризованы, а векторы напряжённости  $\vec{E}_{отр}$  и  $\vec{E}_{прел}$  перпендикулярно поляризованных отражённой и преломлённой электромагнитных волн будем обозначать, как  $\vec{E}_{отр}^{пер}$  и  $\vec{E}_{прел}^{пер}$  (рис. 3.9).

Полагая векторы  $\vec{E}_{над}$  и  $\vec{H}_{над}$  плоских гармонических электромагнитных волн параллельной и перпендикулярной поляризации известными, определим, используя граничные условия для тангенциальных составляющих указанных векторов, величины (модули) векторов  $\vec{E}_{отр}^{пар}$  и  $\vec{E}_{отр}^{пер}$  отражённой волны, а также величины (модули) векторов  $\vec{E}_{прел}^{пар}$  и  $\vec{E}_{прел}^{пер}$  преломлённой волны. Для этого воспользуемся формулами французского физика Френеля (1788-1827), имеющими вид:

$$\left| \vec{E}_{отр}^{пар} \right| = \Phi_{отр}^{пар} \cdot \left| \vec{E}_{над}^{пар} \right| = \left| \frac{n_2 \cdot \cos \varphi_{над} - n_1 \cdot \cos \varphi_{прел}}{n_2 \cdot \cos \varphi_{над} + n_1 \cdot \cos \varphi_{прел}} \right| \cdot \left| \vec{E}_{над}^{пар} \right|, \quad (3.31)$$

$$\left| \vec{E}_{отр}^{пер} \right| = \Phi_{отр}^{пер} \cdot \left| \vec{E}_{над}^{пер} \right| = \left| \frac{n_1 \cdot \cos \varphi_{над} - n_2 \cdot \cos \varphi_{прел}}{n_1 \cdot \cos \varphi_{над} + n_2 \cdot \cos \varphi_{прел}} \right| \cdot \left| \vec{E}_{над}^{пер} \right|, \quad (3.32)$$

$$\left| \vec{E}_{прел}^{пар} \right| = \Phi_{прел}^{пар} \cdot \left| \vec{E}_{над}^{пар} \right| = \left| \frac{2 \cdot n_1 \cdot \cos \varphi_{над}}{n_2 \cdot \cos \varphi_{над} + n_1 \cdot \cos \varphi_{прел}} \right| \cdot \left| \vec{E}_{над}^{пар} \right|, \quad (3.33)$$

$$\left| \vec{E}_{\text{прел}}^{\text{пер}} \right| = \Phi_{\text{прел}}^{\text{пер}} \cdot \left| \vec{E}_{\text{пад}}^{\text{пер}} \right| = \left| \frac{2 \cdot n_1 \cdot \cos \varphi_{\text{пад}}}{n_1 \cdot \cos \varphi_{\text{пад}} + n_2 \cdot \cos \varphi_{\text{прел}}} \right| \cdot \left| \vec{E}_{\text{пад}}^{\text{пер}} \right|, \quad (3.34)$$

где  $\left| \vec{E}_{\text{пад}}^{\text{нар}} \right|$  и  $\left| \vec{E}_{\text{пад}}^{\text{пер}} \right|$  - величины (модули) векторов  $\vec{E}_{\text{пад}}^{\text{нар}}$  и  $\vec{E}_{\text{пад}}^{\text{пер}}$  падающей электромагнитной волны;

$\left| \vec{E}_{\text{отр}}^{\text{нар}} \right|$  и  $\left| \vec{E}_{\text{отр}}^{\text{пер}} \right|$  - величины (модули) векторов  $\vec{E}_{\text{отр}}^{\text{нар}}$  и  $\vec{E}_{\text{отр}}^{\text{пер}}$  отражённой электромагнитной волны;

$\left| \vec{E}_{\text{прел}}^{\text{нар}} \right|$  и  $\left| \vec{E}_{\text{прел}}^{\text{пер}} \right|$  - величины (модули) векторов  $\vec{E}_{\text{прел}}^{\text{нар}}$  и  $\vec{E}_{\text{прел}}^{\text{пер}}$  преломлённой волны;

$\Phi_{\text{отр}}^{\text{нар}}$  и  $\Phi_{\text{отр}}^{\text{пер}}$  - коэффициенты Френеля при отражении от границы раздела сред электромагнитных волн, соответственно, параллельной и перпендикулярной поляризации;

$\Phi_{\text{прел}}^{\text{нар}}$  и  $\Phi_{\text{прел}}^{\text{пер}}$  - коэффициенты Френеля при преломлении на границе раздела сред электромагнитных волн, соответственно, параллельной и перпендикулярной поляризации.

Зная коэффициенты Френеля (3.31) – (3.34) при отражении и преломлении электромагнитных волн параллельной и перпендикулярной поляризации на границе раздела сред, можно определить коэффициенты отражения

$K_{\text{отр}}^{\text{нар}}$ ,  $K_{\text{отр}}^{\text{пер}}$  и преломления  $K_{\text{прел}}^{\text{нар}}$ ,  $K_{\text{прел}}^{\text{пер}}$  электромагнитных волн параллельной и перпендикулярной поляризации на границе раздела сред как отношение величины (модуля) среднего по времени отражённого от границы раздела сред потока электромагнитной энергии к величине (модулю) падающего потока электромагнитной энергии для коэффициентов отражения и как отношение величины (модуля) среднего по времени преломлённого на границе раздела сред потока электромагнитной энергии к величине (модулю) падающего потока электромагнитной энергии для коэффициентов пре-

ломления. С учётом соотношений (3.31) – (3.34), выражения для коэффициентов отражения  $K_{отр}^{нар}$ ,  $K_{отр}^{неп}$  и преломления  $K_{прел}^{нар}$ ,  $K_{прел}^{неп}$  электромагнитных волн параллельной и перпендикулярной поляризации на границе раздела сред будут иметь следующий вид:

$$K_{отр}^{нар} = \frac{\left( \left| \vec{\Pi}_{отр}^{нар} \right| \right)_{cp}}{\left( \left| \vec{\Pi}_{над}^{нар} \right| \right)_{cp}} = \frac{\left( \left| \vec{E}_{отр}^{нар} \right|^2 \right)_{cp}}{\left( \left| \vec{E}_{над}^{нар} \right|^2 \right)_{cp}} = \left( \Phi_{отр}^{нар} \right)^2, \quad (3.35)$$

$$K_{отр}^{неп} = \frac{\left( \left| \vec{\Pi}_{отр}^{неп} \right| \right)_{cp}}{\left( \left| \vec{\Pi}_{над}^{неп} \right| \right)_{cp}} = \frac{\left( \left| \vec{E}_{отр}^{неп} \right|^2 \right)_{cp}}{\left( \left| \vec{E}_{над}^{неп} \right|^2 \right)_{cp}} = \left( \Phi_{отр}^{неп} \right)^2, \quad (3.36)$$

$$K_{прел}^{нар} = \frac{\left( \left| \vec{\Pi}_{прел}^{нар} \right| \right)_{cp}}{\left( \left| \vec{\Pi}_{над}^{нар} \right| \right)_{cp}} = \frac{n_2 \cdot \left( \left| \vec{E}_{прел}^{нар} \right|^2 \right)_{cp}}{n_1 \cdot \left( \left| \vec{E}_{над}^{нар} \right|^2 \right)_{cp}} = \frac{n_2}{n_1} \left( \Phi_{прел}^{нар} \right)^2, \quad (3.37)$$

$$K_{прел}^{неп} = \frac{\left( \left| \vec{\Pi}_{прел}^{неп} \right| \right)_{cp}}{\left( \left| \vec{\Pi}_{над}^{неп} \right| \right)_{cp}} = \frac{n_2 \cdot \left( \left| \vec{E}_{прел}^{неп} \right|^2 \right)_{cp}}{n_1 \cdot \left( \left| \vec{E}_{над}^{неп} \right|^2 \right)_{cp}} = \frac{n_2}{n_1} \left( \Phi_{прел}^{неп} \right)^2, \quad (3.38)$$

где учтено, что для рассматриваемого случая отражения и преломления плоской электромагнитной волны параллельной и перпендикулярной поляризации на плоской границе раздела двух идеальных диэлектрических сред, характеризуемых показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ , для любой поляризации справедливы равенства:

$$\left| \vec{\Pi}_{над} \right| = \left| \vec{E}_{над} \right| \cdot \left| \vec{H}_{над} \right| = \left| \vec{E}_{над} \right| \cdot \frac{\left| \vec{E}_{над} \right|}{Z_1} = \frac{\left| \vec{E}_{над} \right|^2}{Z_1};$$

$$|\vec{H}_{отр}| = |\vec{E}_{отр}| \cdot |\vec{H}_{отр}| = |\vec{E}_{отр}| \cdot \frac{|\vec{E}_{отр}|}{Z_1} = \frac{|\vec{E}_{отр}|^2}{Z_1};$$

$$|\vec{H}_{прел}| = |\vec{E}_{прел}| \cdot |\vec{H}_{прел}| = |\vec{E}_{прел}| \cdot \frac{|\vec{E}_{прел}|}{Z_2} = \frac{|\vec{E}_{прел}|^2}{Z_2};$$

$$Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \frac{1}{n_1}; \quad Z_2 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \frac{1}{n_2}.$$

Из соотношений (3.31) следует, что величина коэффициента отражения  $K_{отр}^{нар} = (\Phi_{отр}^{нар})^2$ , при параллельной поляризации падающей электромагнитной волны становится равной нулю, если соблюдается условие:

$$n_2 \cdot \cos \varphi_{пад} - n_1 \cdot \cos \varphi_{прел} = 0. \quad (3.39)$$

Воспользовавшись третьим законом Снеллиуса из соотношения (3.39) можно получить следующие выражения для определения той величины угла падения  $\varphi_{пад}$ , при которой коэффициент отражения  $K_{отр}^{нар}$ , при параллельной поляризации падающей электромагнитной волны, становится равным нулю:

$$\sin \varphi_{пад} = \frac{n_2}{\sqrt{n_1^2 + n_2^2}}, \quad (3.40)$$

$$\cos \varphi_{пад} = \frac{n_1}{\sqrt{n_1^2 + n_2^2}}, \quad (3.41)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{пад} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (3.42)$$

Угол падения, величину  $\varphi_{пад}$  которого определяют соотношениями (3.40) - (3.42), называют: либо углом Брюстера, либо углом полного преломления, либо углом полной поляризации. Углом Брюстера его называют потому, что впервые величина этого угла экспериментально была измерена

в 1815 году шотландским физиком Брюстером (1781-1868 гг). Углом полного преломления его называют потому, что, падая на границу раздела двух сред под этим углом, электромагнитная волна не отражается от границы раздела двух сред, а полностью преломляется во вторую среду. Углом полной поляризации его называют потому, что при падении на границу раздела двух сред под этим углом электромагнитной волны произвольной поляризации, отражённая от границы раздела сред электромагнитная волна будет полностью поляризована перпендикулярно плоскости падения, так как составляющая, параллельная плоскости падения, не отражается от границы раздела сред.

Величины  $\varphi_{пад}$ ,  $\varphi_{отр}$  и  $\varphi_{прел}$  изменяются в пределах от нуля до  $90^\circ$ .

Из третьего закона Снеллиуса следует, что если  $n_1 < n_2$  и электромагнитная волна распространяется из среды с показателем преломления  $n_1$  в среду с показателем преломления  $n_2$ , то величина  $\varphi_{прел}$  угла преломления всегда будет меньше величины  $\varphi_{пад}$  угла падения, если величина  $\varphi_{пад}$  будет больше нуля.

Из третьего закона Снеллиуса следует также, что если  $n_1 > n_2$  и электромагнитная волна распространяется из среды с показателем преломления  $n_1$  в среду с показателем преломления  $n_2$ , то величина  $\varphi_{прел}$  угла преломления всегда будет больше величины  $\varphi_{пад}$  угла падения, если величина  $\varphi_{пад}$  будет больше нуля. При этом может наступить такой момент, когда величина  $\varphi_{прел}$  угла преломления станет равной  $90^\circ$ , а величина  $\varphi_{пад}$  угла падения будет меньше  $90^\circ$ . Значение величины  $\varphi_{пад}$  угла падения при этом будет определяться из третьего закона Снеллиуса в виде:

$$\sin \varphi_{\text{пад}} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (3.43)$$

если учесть, что  $\sin \varphi_{\text{прел}} = 1$ , когда величина  $\varphi_{\text{прел}}$  равна  $90^\circ$ .

Из второго закона Снеллиуса следует, что величина  $\varphi_{\text{отр}}$  угла отражения всегда равна величине  $\varphi_{\text{пад}}$  угла падения, следовательно, в случае, когда величина  $\varphi_{\text{пад}}$  угла падения будет определяться из соотношения (3.43), величина  $\varphi_{\text{отр}}$  угла отражения также может быть определена из соотношения (3.43). Итак, если  $n_1 > n_2$  и электромагнитная волна распространяется из первой среды с показателем преломления  $n_1$  во вторую среду с показателем преломления  $n_2$ , то, падая на границу раздела сред под углом, величина которого определяется из соотношения (3.43), электромагнитная волна не проникает во вторую среду с показателем преломления  $n_2$ , а, отражаясь от границы раздела остаётся в пределах первой среды; поэтому такой угол отражения называют углом полного внутреннего отражения.

Если соблюдается условие:

$$n_2 \gg n_1, \quad (3.44)$$

то справедливы равенства:

$$K_{\text{отр}}^{\text{нар}} = 1, \text{ т.е. } \left| \vec{\Pi}_{\text{отр}}^{\text{нар}} \right| = \left| \vec{\Pi}_{\text{пад}}^{\text{нар}} \right|, \quad (3.45)$$

$$K_{\text{отр}}^{\text{нер}} = 1, \text{ т.е. } \left| \vec{\Pi}_{\text{отр}}^{\text{нер}} \right| = \left| \vec{\Pi}_{\text{пад}}^{\text{нер}} \right|, \quad (3.46)$$

$$K_{\text{прел}}^{\text{нар}} = 0, \text{ т.е. } \left| \vec{\Pi}_{\text{прел}}^{\text{нар}} \right| = 0 \text{ даже, если } \left| \vec{\Pi}_{\text{пад}}^{\text{нар}} \right| \neq 0, \quad (3.47)$$

$$K_{\text{прел}}^{\text{нер}} = 0, \text{ т.е. } \left| \vec{\Pi}_{\text{прел}}^{\text{нер}} \right| = 0 \text{ даже, если } \left| \vec{\Pi}_{\text{пад}}^{\text{нер}} \right| \neq 0. \quad (3.48)$$

Следует иметь в виду, что соотношения (3.44) – (3.48) практически

соблюдаются, если первая среда является диэлектриком, а вторая среда - металлом (достаточно считать металлом границу раздела сред).

На рис.3.10 представлены графики модулей функций  $K_{отр}^{нар} = f_1(\varphi_{пад})$ ,  $K_{отр}^{неп} = f_2(\varphi_{пад})$ ,  $K_{прел}^{нар} = f_3(\varphi_{пад})$  и  $K_{прел}^{неп} = f_4(\varphi_{пад})$ , определяемых соотношениями (3.45) – (3.48). Графики построены в предположении, что первой средой является идеальный диэлектрик, имеющий показатель преломления  $n_1 = 1$ , а второй средой является реальный диэлектрик – фторопласт с  $n_2 = 1,673$ . В табл.3.1 представлены величины  $\varphi_{прел}$  и  $K_{отр}^{нар}$ ,  $K_{отр}^{неп}$ ,  $K_{прел}^{нар}$ ,  $K_{прел}^{неп}$ , вычисленные по приведенным выше формулам при  $\varphi_{пад} = 0^0, 15^0, 30^0, 45^0, 60^0, 75^0, 90^0$ . Для рассматриваемых сред величина угла Брюстера равна

$$\varphi_{БР} = \arctg\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \arctg(n_2) = \arctg(1,673) = 59^0 06'$$

### Описание лабораторной установки

Структурная схема лабораторной установки представлена на рис. 3.11. Лабораторная установка состоит из: СВЧ генератора 1; неподвижной передающей рупорно-линзовой антенны 2; поворотного стола 3 с устанавливаемым на нём диэлектрическим полуцилиндром 4; подвижной приёмной рупорно-линзовой антенны 5; детекторной секции 6; измерительного усилителя 7; металлической пластины 8. Поворотный стол снабжён шкалами для отсчёта величин углов падения, отражения и преломления. Величины  $\varphi_{пад}$  угла падения устанавливаются путём вращения поворотного стола относительно неподвижной передающей антенны, величины  $\varphi_{отр}$  угла отражения устанавливаются путём вращения подвижной приёмной антенны относительно зафиксированного, в определённом положении, поворотного стола, величины  $\varphi_{прел}$  угла прелом-

ления устанавливаются так же, как и величины угла отражения. Диэлектрический полуцилиндр 4 является моделью второй диэлектрической среды с показателем преломления  $n_2$ . Подвижная, приёмная рупорно-линзовая антенна 5 служит для измерения величин  $|\vec{\Pi}_{пад}^{нар}|$  и  $|\vec{\Pi}_{пад}^{пер}|$  падающего,  $|\vec{\Pi}_{отр}^{нар}|$  и  $|\vec{\Pi}_{отр}^{пер}|$  отражённого,  $|\vec{\Pi}_{прел}^{нар}|$  и  $|\vec{\Pi}_{прел}^{пер}|$  преломлённого электромагнитного поля. Для изменения поляризации электромагнитного поля антенны 2 и 5 снабжены устройствами, позволяющими поворачивать антенны вокруг их горизонтальных осей. Металлическую пластину 8 устанавливают на диэлектрический полуцилиндр 4 для измерения величин  $|\vec{\Pi}_{пад}^{нар}|$  и  $|\vec{\Pi}_{пад}^{пер}|$  падающего поля.

Таблица 3.1

$\varphi_{пад}$	$\varphi_{прел}$	$K_{отр}^{нар}$	$K_{отр}^{пер}$	$K_{прел}^{нар}$	$K_{прел}^{пер}$
$0^0$	$0^0$	0,063	0,063	0,986	0,986
$15^0$	$8^055'$	0,058	0,069	0,971	0,960
$30^0$	$17^024'$	0,042	0,088	0,916	0,871
$45^0$	$24^055'$	0,017	0,132	0,806	0,713
$60^0$	$31^012'$	0,0001	0,232	0,616	0,473
$75^0$	$35^015'$	0,095	0,465	0,302	0,178
$90^0$	$36^042'$	1	1	0	0

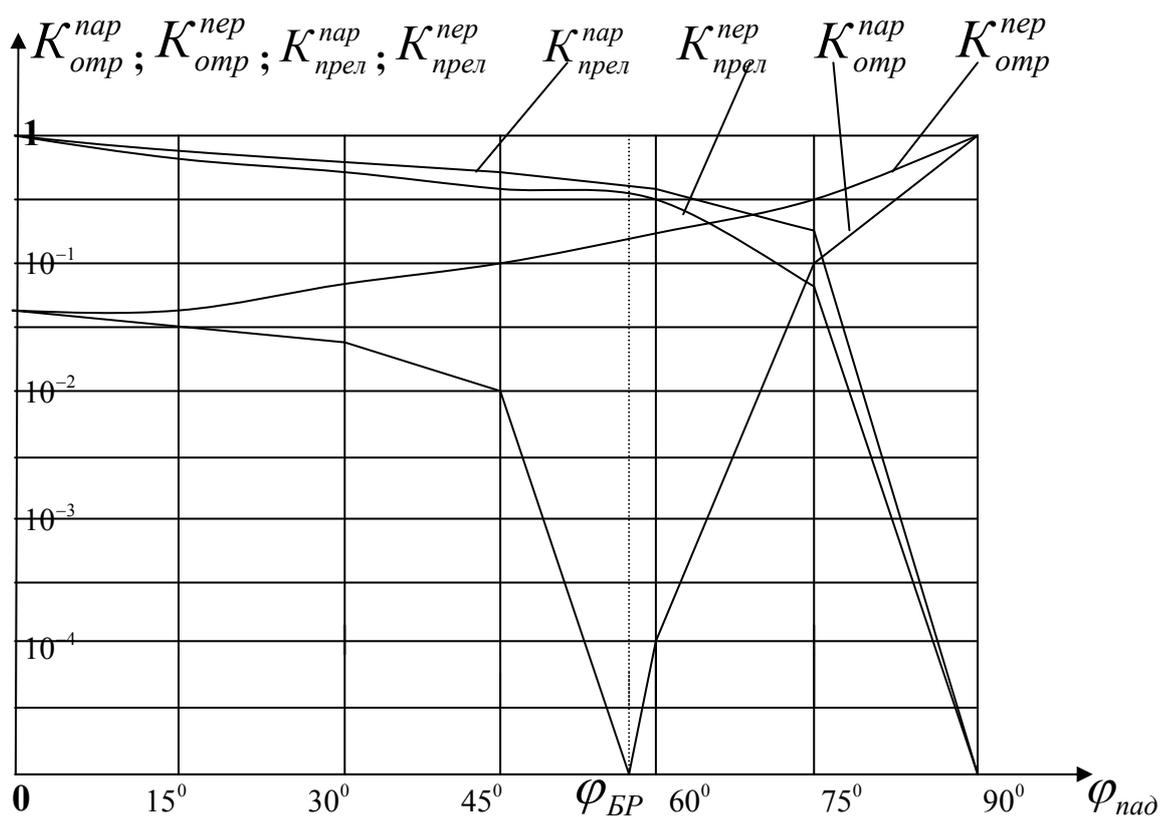


Рис. 3.10

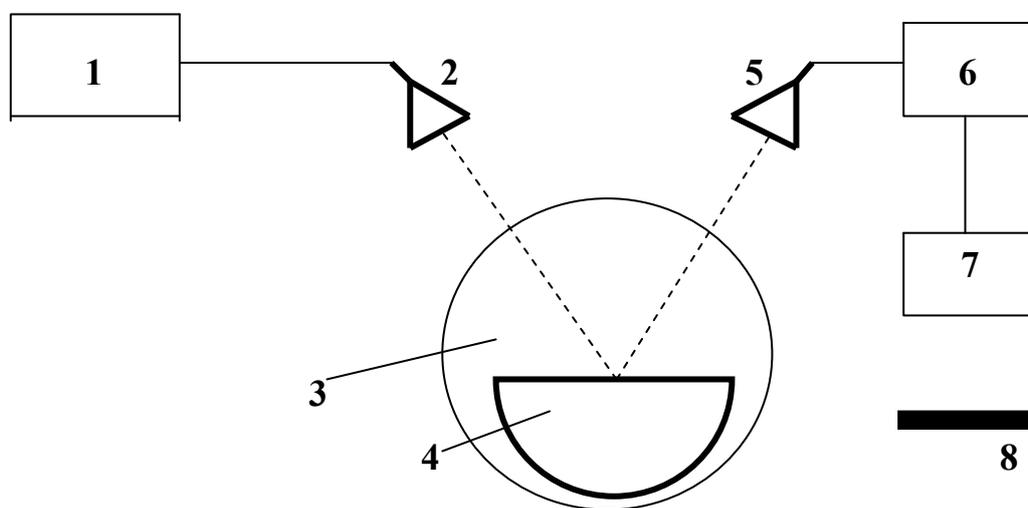


Рис. 3.11

### Порядок выполнения работы

1. Включить генератор 1 и настроить его на одну из частот  $f$ .
2. Исследовать зависимость величины коэффициента отражения  $K_{отр}^{нар}$  от

величины  $\varphi_{пад}$  угла падения. Для этого:

- повернуть неподвижную передающую рупорно-линзовую антенну 2 и подвижную приёмную рупорно-линзовую антенну 5 вокруг их горизонтальных осей в положение (знак  $\parallel$  на антеннах), при котором они будут работать на параллельно поляризованных электромагнитных волнах;

- установить на поворотный стол 3 диэлектрический полуцилиндр 4 так, чтобы неподвижная передающая рупорно-линзовая антенна 2 и подвижная приёмная рупорно-линзовая антенна 5 были направлены в сторону плоской прямоугольной части диэлектрического полуцилиндра 4;

- установить на плоскую прямоугольную часть диэлектрического полуцилиндра 4 металлическую пластину 8;

- поворотом стола 3 устанавливать различные допустимые значения величин

$\varphi_{пад}$  угла падения; поворачивая подвижную приёмную рупорно-линзовую антенну 5, устанавливать различные допустимые значения величин  $\varphi_{отр}$  угла

отражения, соответствующие закону Снеллиуса (величина  $\varphi_{отр}$  угла отражения должна быть равна величине  $\varphi_{пад}$  угла падения); измерять (с помощью

измерительного усилителя 7) величины  $|\vec{\Pi}_{отр}^{нар}| = |\vec{\Pi}_{пад}^{нар}|$  при каждом значении

$\varphi_{пад}$  угла падения;

- снять металлическую пластину 8 и при тех же значениях  $\varphi_{пад}$  угла падения, которые устанавливались ранее с металлической пластиной 8, измерять

величины  $|\vec{\Pi}_{отр}^{нар}|$  при каждом устанавливаемом значении  $\varphi_{пад}$  угла падения;

- разделить (для каждого значения  $\varphi_{пад}$  угла падения) величину  $|\vec{\Pi}_{отр}^{нар}|$  на

величину  $|\vec{\Pi}_{пад}^{нар}|$  и получить значения коэффициента отражения  $K_{отр}^{нар}$  зави-

сящие от величины  $\varphi_{над}$  угла падения;

- определить величину  $\varphi_{над} = \varphi_{БР}$  угла падения, при которой значение коэффициента отражения  $K_{отр}^{нар}$  минимально, и, пользуясь соотношением (3.42), рассчитать значение  $n_2$  показателя преломления диэлектрика полуцилиндра 4.

3. Исследовать зависимость величины коэффициента преломления  $K_{прел}^{нар}$  от величины  $\varphi_{над}$  угла падения. Для этого:

- сориентировать на поворотном столе 3 диэлектрический полуцилиндр 4 так, чтобы неподвижная передающая рупорно-линзовая антенна 2 была направлена в сторону плоской прямоугольной части диэлектрического полуцилиндра 4, а подвижная приёмная рупорно-линзовая антенна 5 была направлена в сторону цилиндрической поверхности диэлектрического полуцилиндра 4;

- поворачивать стол 3 и, устанавливая различные допустимые значения величин  $\varphi_{над}$  угла падения, измерять величины  $\varphi_{прел}$  угла преломления и значения  $|\vec{\Pi}_{прел}^{нар}|$ , соответствующие каждому установленному значению  $\varphi_{над}$  угла падения (причём значения  $\varphi_{прел}$  угла преломления и значения  $|\vec{\Pi}_{прел}^{нар}|$  фиксировать при достижении максимального показания индикаторного прибора измерительного усилителя 7 для каждого установленного значения  $\varphi_{над}$  угла падения);

- разделить (для каждого значения  $\varphi_{над}$  угла падения) величину  $|\vec{\Pi}_{прел}^{нар}|$  на величину  $|\vec{\Pi}_{над}^{нар}|$ , полученную в п.2, и получить значения коэффициента преломления  $K_{прел}^{нар}$ , зависящие от величины  $\varphi_{над}$  угла падения.

4. Исследовать зависимость величин коэффициентов отражения  $K_{отр}^{nep}$  и преломления  $K_{прел}^{nep}$  от величины  $\varphi_{пад}$  угла падения. Для этого:

- повернуть неподвижную передающую рупорно-линзовую антенну 2 и подвижную приёмную рупорно-линзовую антенну 5 вокруг их горизонтальных осей в положение (знак  $\perp$  на антеннах), при котором они будут работать на перпендикулярно поляризованных электромагнитных волнах, и далее действовать так, как указано в п.2 и п.3.

5. Построить графики функций  $K_{отр}^{нар} = f_1(\varphi_{пад})$ ,  $K_{отр}^{nep} = f_2(\varphi_{пад})$ ,  $K_{прел}^{нар} = f_3(\varphi_{пад})$  и  $K_{прел}^{nep} = f_4(\varphi_{пад})$ , используя экспериментальные данные п.2 – 4 и теоретические соотношения при значении диэлектрической проницаемости полуцилиндра, определенной по значению угла Брюстера.

### Содержание отчета

- Структурная схема лабораторной установки.

- Графики функций  $K_{отр}^{нар} = f_1(\varphi_{пад})$ ,  $K_{отр}^{nep} = f_2(\varphi_{пад})$ ,  $K_{прел}^{нар} = f_3(\varphi_{пад})$  и  $K_{прел}^{nep} = f_4(\varphi_{пад})$ , построенные с использованием экспериментальных данных и теоретических соотношений.

- Результаты вычислений показателя преломления  $n_2$  с использованием экспериментально определённого в п.2 значения  $\varphi_{БР}$ .

- Краткие выводы по лабораторной работе.

### Вопросы для самопроверки

1. Как определяют вид поляризации электромагнитных волн при исследовании отражения и преломления этих волн на границе раздела сред?

2. Как определяют понятия: плоскость падения, плоскость поляризации, угол падения, угол отражения и угол преломления?

3. Как формулируются законы Снеллиуса?

4. Определите понятие угла Брюстера и поясните, почему этот угол называют также углом полной поляризации и углом полного преломления?

5. При каких условиях может наблюдаться явление полного внутреннего отражения?

Литература:[3], с. 157-179.

### 3.6.6. Исследование влияния поверхности Земли на распространение радиоволн

#### Цель работы

Исследовать влияние плоской и сферической поверхности Земли на распространение радиоволн.

#### Основные теоретические положения.

Комплексная амплитуда  $E_a$  вектора напряжённости электрического поля в вакууме может быть представлена в виде:

$$E_a = \frac{\sqrt{60P_{изл} D_{изл}}}{r_1} e^{-i\kappa r_1} = E_m \cdot e^{-i\kappa r_1}, \text{ В/м,} \quad (3.49)$$

где  $P_{изл}$  - мощность, излучаемая передающей антенной;  $r_1$  - расстояние от точки излучения (от выхода передающей антенны) до точки наблюдения (до

входа приёмной антенны);  $\kappa = \frac{2\pi}{\lambda}$  - волновое число в вакууме;  $\lambda$  - длина

электромагнитной волны в вакууме;  $D_{изл}$  - коэффициент направленного действия

передающей антенны (излучателя);  $E_m = \frac{\sqrt{60P_{изл} D_{изл}}}{r_1}$  - действительная

амплитуда вектора напряжённости электрического поля, изменяющегося по гармоническому закону, в вакууме.

Рассмотрим влияние кривизны поверхности Земли на распространение радиоволн.

Предположим вначале, что поверхность Земли является плоской, а над этой поверхностью находится вакуум. В этом случае электродинамическая задача формулируется следующим образом: передающая антенна, имеющая коэффициент направленного действия  $D_{изл}$  и излучающая мощность  $P_{изл}$ , расположена в точке излучения А на высоте  $h_{изл}$  над плоскостью Земли. В точке наблюдения В находится вход приёмной антенны, расположенной на высоте  $h_{пр}$  над плоскостью Земли; расстояние между точками излучения А и наблюдения В равно  $r_1$  (рис. 3.12). Предположим также, что высоты расположения передающей и приёмной антенн над плоскостью Земли больше длины  $\lambda$  радиоволны, распространяющейся из точки излучения А в точку наблюдения В. Требуется определить величину комплексной амплитуды вектора напряжённости электрического поля в точке наблюдения В (рис. 3.12).

В точку наблюдения В электромагнитная волна приходит двумя путями: двигаясь из точки излучения А по прямолинейному отрезку АВ (прямая волна) и двигаясь из точки излучения А по ломаной АСВ, (отражённая волна).

Выражения для значений комплексных амплитуд векторов напряжённости электрического поля прямой  $E_{пря}$  и отражённой  $E_{отр}$  волн в точке приёма В будут иметь следующий вид:

$$E_{пря} = \frac{\sqrt{60P_{изл} D_{изл}}}{r_1} e^{-ikr_1}, \quad (3.50)$$

$$\begin{aligned} E_{отр} &= \frac{\sqrt{60P_{изл} D_{изл}}}{r_2} e^{-ikr_2} \cdot K_{отр} = \\ &= \frac{\sqrt{60P_{изл} D_{изл}}}{r_2} e^{-ikr_2} \cdot |K_{отр}| \cdot e^{i\varphi_{отр}}, \end{aligned} \quad (3.51)$$

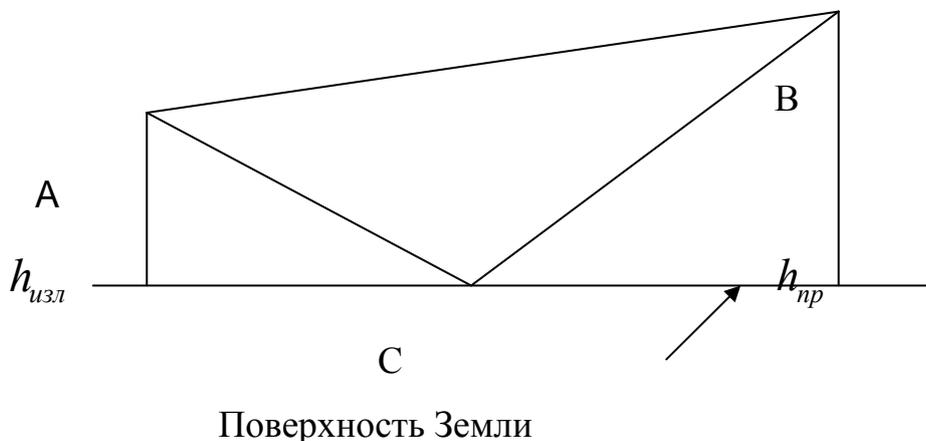


Рис. 3.12

где  $r_1 = |AB|$  - длина прямолинейного отрезка  $[AB]$ , т.е. расстояние от точки излучения А до точки наблюдения В;  $r_2 = |ACB|$  - длина ломаной  $[ACB]$ ;

$K_{отр} = |K_{отр}| \cdot e^{i\varphi_{отр}}$  - комплексный коэффициент отражения электромагнитной волны от поверхности Земли, имеющий модуль  $|K_{отр}|$  и аргумент  $\varphi_{отр}$ .

Расстояние  $r_2$  всегда больше  $r_1$  на некоторую величину  $\Delta r$ , поэтому всегда справедливо равенство:

$$r_2 = r_1 + \Delta r, \quad (3.52)$$

где  $\Delta r > 0$ .

На линиях радиосвязи всегда справедливы неравенства:

$$h_{изл} \ll r_1, h_{пр} \ll r_1, \Delta r \ll r_1, \quad (3.53)$$

поэтому в знаменателе амплитудного множителя в формуле (3.51) можно заменить выражение  $r_2 = r_1 + \Delta r$  на  $r_1$ , но в выражении  $(-i\kappa r_2)$  обязательно необходимо оставить  $r_2 = r_1 + \Delta r$ , при этом формула (3.51) примет вид:

$$\begin{aligned}
 E_{отр} &= \frac{\sqrt{60P_{изл} D_{изл}}}{r_1} \bullet e^{-i\kappa(r_1 + \Delta r)} \bullet |K_{отр}| \bullet e^{i\varphi_{отр}} = \\
 &= \frac{\sqrt{60P_{изл} D_{изл}}}{r_1} \bullet e^{-i\kappa r_1} \bullet |K_{отр}| \bullet e^{i(\varphi_{отр} - \kappa \bullet \Delta r)} \quad (3.54)
 \end{aligned}$$

Результирующее значение комплексной амплитуды вектора напряжённости электрического поля в точке наблюдения В равно:

$$\begin{aligned}
 E &= E_{пря} + E_{отр} = \frac{\sqrt{60P_{изл} D_{изл}}}{r_1} \bullet e^{-i\kappa r_1} \times \\
 &\times \left[ 1 + |K_{отр}| \bullet e^{i(\varphi_{отр} - \kappa \Delta r)} \right] = E_a \bullet V \quad (3.55)
 \end{aligned}$$

Выражение перед квадратными скобками в (3.55) совпадает с соотношением для комплексной амплитуды  $E_a$  вектора напряжённости электрического поля в точке наблюдения, удалённой от точки излучения на расстояние  $r_1$  в свободном пространстве.

Выражение в квадратных скобках в (3.55) представляет собой комплексный множитель  $V = |V| \bullet e^{i\psi}$ , учитывающий влияние плоской поверхности Земли на распространение радиоволн:

$$V = |V| \bullet e^{i\psi} = 1 + |K_{отр}| \bullet e^{i(\varphi_{отр} - \kappa \bullet \Delta r)} \quad (3.56)$$

причём модуль  $|V|$  комплексного множителя  $V$  имеет вид:

$$|V| = \sqrt{1 + |K_{omr}|^2 + 2 \cdot |K_{omr}| \cdot \cos(\varphi_{omr} - \kappa \cdot \Delta r)}, \quad (3.57)$$

а аргумент  $\psi$  комплексного множителя -

$$\psi = \arg V = \arctg \frac{|K_{omr}| \cdot \sin(\varphi_{omr} - \kappa \cdot \Delta r)}{1 + |K_{omr}| \cdot \cos(\varphi_{omr} - \kappa \cdot \Delta r)}. \quad (3.58)$$

Формулу (3.55) называют интерференционной формулой. Из соотношений (3.55)-(3.58) следует, что для определения комплексной амплитуды  $E$  вектора напряжённости электрического поля в точке наблюдения при распространении радиоволн над плоской поверхностью Земли должны быть известны следующие величины:

$P_{изл}, D_{изл}, \lambda, h_{изл}, h_{np}, r_1, r_2, |K_{omr}|, \varphi_{omr}$ .

Формула (3.57) может быть существенно упрощена, если соблюдается условие:

$$r_1 \geq \frac{18 \cdot h_{изл} \cdot h_{np}}{\lambda}, \quad (3.59)$$

при котором:  $\psi = 0$ ,  $|V| = \frac{4\pi \cdot h_{изл} \cdot h_{np}}{\lambda \cdot r_1}$ . Формула (3.55) для результирующего значения комплексной амплитуды  $E$  вектора напряжённости электрического поля в точке наблюдения В принимает вид:

$$E \approx \frac{\sqrt{60P_{изл} D_{изл}}}{r_1} \cdot e^{-i\kappa r_1} \cdot \frac{4\pi \cdot h_{изл} \cdot h_{np}}{\lambda \cdot r_1}, \text{ а результирующее значение}$$

действительной амплитуды  $E_{mB}$  вектора напряжённости электрического поля в точке наблюдения В принимает вид:

$$E_{mB} \approx \frac{\sqrt{60P_{изл} D_{изл}}}{r_1^2} \cdot \frac{4\pi \cdot h_{изл} \cdot h_{пр}}{\lambda} \quad (3.60)$$

и носит название квадратичной формулы, или формулы Введенского Б.А.

Интерференционная формула (3.55) и квадратичная формула (3.60) позволяют учесть влияние плоской поверхности Земли на распространение радиоволн. Однако, более точно поверхность Земли моделирует гладкая сферическая поверхность радиуса  $a$ .

Для учёта влияния сферичности поверхности Земли на распространение радиоволн, обычно, применяют инженерный метод приведённых высот. Суть его состоит в том, что выражение (3.60), полученное для расчёта множителя ослабления при отражении радиоволн от плоской Земли, можно использовать и для случая отражения радиоволн от сферической поверхности Земли, если заменить истинные высоты антенн, так называемыми, “приведёнными” высотами. Они отсчитываются от воображаемой плоскости, касательной к сферической поверхности Земли, в точке отражения радиоволн (рис. 3.13).

Выражения для “приведённых” высот имеют вид:

$$h'_{изл} = h_{изл} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r_1}{R_B} \right)^2 \right], \quad (3.61)$$

$$h'_{пр} = h_{пр} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r_1}{R_B} \right)^2 \right], \quad (3.62)$$

где  $h_{изл} = |AA_1|$  - известная высота расположения передающей антенны над сферической поверхностью Земли;  $h_{пр} = |BB_1|$  - известная высота расположения приёмной антенны над сферической поверхностью Земли;  $r_1 = |AB|$  - известное расстояние между передающей и приёмной антеннами, расположенными в

“освещённой” области над сферической поверхностью Земли, т.е. в той области, где соблюдается условие  $r_1 < R_B \approx \sqrt{2a} \cdot (\sqrt{h_{изл}} + \sqrt{h_{пр}})$ ;  $R_B$  - расстояние прямой видимости.

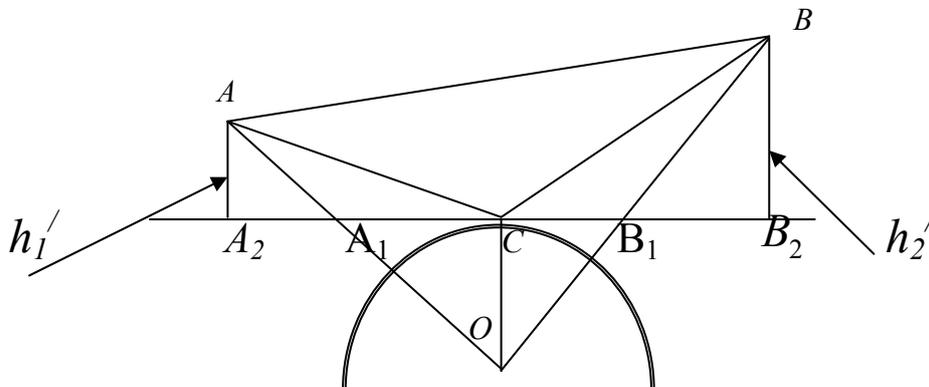


Рис. 3.13

### Описание лабораторной установки

Структурная схема лабораторной установки для исследования особенностей распространения радиоволн вдоль земной поверхности представлена на рис. 3.14. В состав установки входят: генератор электромагнитной энергии 1; передающая антенна 2 с элементами крепления и поворота плоскости поляризации излучаемых электромагнитных волн; шаровой сегмент 3, моделирующий плоскую и сферическую земную поверхность; приёмную антенну 4 с элементами крепления и поворота плоскости поляризации принимаемых электромагнитных волн; детекторную секцию 5; измерительный усилитель 6.

### Порядок выполнения работы

1. Включить генератор 1 и настроить его на одну из частот  $f$  по указанию преподавателя.

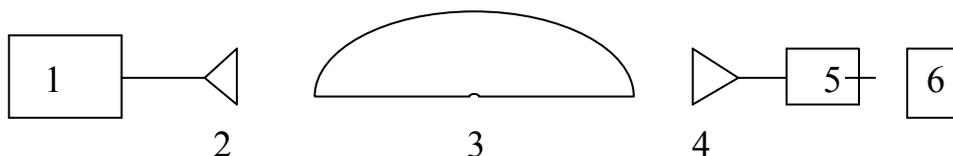


Рис. 3.14

2. Повернуть устройство 3, моделирующее плоскую и сферическую земную поверхность, плоской стороной вверх.

3. Установить высоты передающей и приёмной антенн над плоской земной поверхностью так, чтобы они были больше длины волны .

4. Установить передающую и приёмную антенны в такое положение, чтобы передающая антенна излучала, а приёмная антенна принимала электромагнитные волны горизонтальной поляризации.

5. Фиксировать показания индикаторного прибора измерительного усилителя 6,

обратив внимание, что, начиная с расстояния  $r_1 = \frac{18 \cdot h_{изл} \cdot h_{пр}}{\lambda}$ , осцилляции

принимаемого сигнала прекращаются, и величина принимаемого сигнала убы-

вает при возрастании расстояния  $r_1$  так, как предписывает соотношение (3.60).

Построить график зависимости принимаемого сигнала от расстояния  $r_1$  .

6. Измерив высоту  $h_c$  и диаметр  $d_c$  основания шарового сегмента, рассчитать

радиус  $R_c = \frac{\left(\frac{d_c}{2}\right)^2 + h_c^2}{2 \cdot h_c}$  сферической поверхности шарового сегмента.

7. Рассчитать расстояние прямой видимости

$$R_B = \sqrt{2 \cdot R_c} \cdot \left( \sqrt{h_{изл}} + \sqrt{h_{пр}} \right).$$

8. Повторить измерения аналогичные п.5, следя за тем, чтобы расстояние  $r_1$  оставалось меньше расстояния прямой видимости. Если это условие, при выбран-

ных значениях  $h_{изл}, h_{пр}, \lambda$  , выполнить не удаётся, то следует выбрать другие

значения  $h_{изл}, h_{пр}, \lambda$  , при которых будет соблюдаться это условие.

9. Пользуясь соотношениями (3.61) и (3.62), рассчитать значения приведённых

высот  $h'_{изл}, h'_{пр}$  и сравнить их с высотами  $h_{изл}, h_{пр}$ .

10. Рассчитать, при различных  $R_1$ :

значения  $|V| = \frac{4\pi \cdot h_{изл} \cdot h_{пр}}{\lambda \cdot r_1}$  модуля комплексного множителя

$V = |V| \cdot e^{i\psi}$ , учитывающего влияние плоской поверхности Земли на рас-

пространение радиоволн; значения  $|V| = \frac{4\pi \cdot h'_{изл} \cdot h'_{пр}}{\lambda \cdot r_1}$  модуля комплекс-

ного множителя  $V = |V| \cdot e^{i\psi}$ , учитывающего влияние сферической по-  
верхности Земли на распространение радиоволн, и сравнить результаты.

### Содержание отчета

- Результаты расчётов и экспериментов по п.1-10.
- Краткие выводы по лабораторной работе.
- Структурная схема лабораторной установки.

#### Вопросы для самопроверки

1. Как влияет поверхность Земли на распространение радиоволн?
2. Как определяют множитель, учитывающий влияние поверхности Земли на распространение радиоволн?
3. При каких условиях допустимо применение квадратичной формулы?
4. Как можно учесть влияние сферичности поверхности Земли на распространение радиоволн?
5. Какое расстояние называют расстоянием прямой видимости?

Литература: [2], с. 21-26.

## 4. Блок контроля освоения дисциплины

### 4.1. Общие указания

Блок контроля освоения дисциплины включает в себя две контрольные

работы, вопросы для самопроверки, приведенные в опорном конспекте и лабораторном практикуме; тесты: тренировочные и рубежного контроля, вопросы для подготовки к экзаменам.

## 4.2. Задания на контрольные работы

### Работа №1. Методические указания к выполнению работы

Учебным планом по дисциплине "Электродинамика и распространение радиоволн" (часть 1 - электродинамика) предусмотрено выполнение одной контрольной работы, состоящей из двух задач. Номер варианта контрольной работы студент выбирает по предпоследней цифре своего шифра.

<i>Предпоследняя цифра шифра</i>	<i>Номер варианта</i>
1 или 6	1
2 или 7	2
3 или 8	3
4 или 9	4
5 или 0	5

Номер набора числовых данных должен совпадать с последней цифрой.

При решении задач все вычисления необходимо производить с точностью до второго знака после запятой. Все величины должны быть выражены в Международной системе единиц (СИ).

При выполнении контрольной работы необходимо обратить внимание на следующие типичные ошибки, допускаемые студентами:

- 1) использование различных систем единиц;
- 2) использование относительной диэлектрической и магнитной проницаемостей сред вместо их абсолютных значений;
- 3) неверное обозначение единиц вычисляемых величин;
- 4) ошибки в преобразованиях при получении расчетных соотношений;
- 5) арифметические ошибки при выполнении вычислений.

### Вариант 1

**Задача 1.1.** Найти амплитуды составляющих векторов напряженностей

электрического и магнитного полей элементарного электрического диполя в вакууме в экваториальной плоскости. Длина диполя  $l$ , амплитуда тока  $I$ , расстояние до точки наблюдения  $r$ , частота питающего тока  $f$ .

N	$l$ , см	$r$ , км	$I$ , А	$f$ , МГц
1	5	10	1	300
2	6	12	2	290
3	7	14	3	280
4	8	16	4	270
5	9	18	5	260
6	10	20	6	250
7	11	22	7	240
8	12	24	8	230
9	13	26	9	220
0	14	28	10	210

Литература: [1], с.43-48.

**Задача 1.2.** Определить размеры поперечного сечения прямоугольного волновода для работы на основном типе волны  $H_{10}$ . Частота генератора  $f$ , волновод заполнен диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Рассчитать длину волны в волноводе, фазовую и групповую скорости.

N	$f$ , МГц	$\epsilon$	N	$f$ , МГц	$\epsilon$
1	9000	1,4	6	10000	1,9
2	9200	1,5	7	10200	2,0
3	9400	1,6	8	10400	2,2
4	9600	1,7	9	10600	2,3
5	9800	1,8	0	10800	2,4

Литература: [1], с. 57-67.

## Вариант 2

**Задача 2.1.** Найти сопротивление излучения и мощность, излучаемую элементарным электрическим диполем в однородной среде с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Длина диполя  $l$ , амплитуда тока в излучателе  $I$ , частота колебаний  $f$ .

N	$l$ , см	$I$ , А	$f$ , МГц	$\epsilon$
1	20	1	500	2.2
2	22	2	490	2.3
3	24	3	480	2.4
4	26	4	470	2.5
5	28	5	460	2.6
6	30	6	450	2.7
7	32	7	440	2.8
8	34	8	430	2.9
9	36	9	420	3.0
0	38	10	410	3.1

Литература: [1], с.46 - 47.

**Задача 2.2.** Определить радиус поперечного сечения круглого волновода для работы на основном типе волны  $H_{11}$ . Частота генератора  $f$ , волновод заполнен диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Рассчитать критическую длину волны, длину волны в волноводе, фазовую и групповую скорости.

N	$f$ , МГц	$\epsilon$	N	$f$ , МГц	$\epsilon$
1	10000	2.2	6	9500	2.7
2	9900	2.3	7	9400	2.8
3	9800	2.4	8	9300	2.9
4	9700	2.5	9	9200	3.0
5	9600	2.6	0	9100	3.1

Литература: [1], с.73-81.

### Вариант 3

**Задача 3.1.** Найти амплитуды векторов напряженностей электрического и магнитного полей, создаваемых элементарным магнитным излучателем (квадратной рамкой) в вакууме. Рамка расположена в экваториальной плоскости, сторона рамки  $l$ , амплитуда тока  $I$ , длина волны  $\lambda$ , точка наблюдения расположена на расстоянии  $r$  под углом  $\theta = \pi / 2$ .

N	$l$ , см	$I$ , А	$\lambda$ , м	$r$ , км
1	5	1	1	5
2	6	1.5	1.2	6
3	7	2	1.4	7
4	8	2.5	1.6	8
5	9	3	1.8	9
6	10	3.5	2	10
7	11	4	2.2	11
8	12	4.5	2.4	12
9	13	5	2.6	13
0	14	5.5	2.8	14

Литература: [1], с.48.

**Задача 3.2.** Определить диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  среды в прямоугольном волноводе с размерами поперечного сечения  $a \times b$ , если при частоте генератора  $f$  длина волны в волноводе равна  $\lambda_B$  и волновод работает на волне  $E$ .

N	$f$ , МГц	$a$ , мм	$b$ , мм	$\lambda_B$ , мм
---	-----------	----------	----------	------------------

1	10000	23	10	32
2	9800	24	11	33
3	9600	25	12	34
4	9400	26	13	35
5	9200	27	14	36
6	9000	28	15	37
7	8800	29	16	38
8	8600	30	17	39
9	8400	31	18	40
0	8200	32	19	41

Литература: [1], с.57-73.

#### Вариант 4

**Задача 4.1.** Определить ток и сопротивление излучения антенны, находящейся в вакууме, имеющей длину  $l$ , работающей на частоте  $f$  и излучающей мощность  $P_{\text{изл}}$ .

N	$l$ , м	$f$ , кГц	$P_{\text{изл}}$ , кВт
1	50	190	100
2	60	180	110
3	70	170	120
4	80	160	130
5	90	150	140
6	100	140	150
7	110	130	160
8	120	120	170
9	130	110	180
0	140	100	190

Литература: [1], с.47.

**Задача 4.2.** Определить диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  вещества, заполняющего круглый волновод, если фазовая скорость основной волны  $H_{11}$  в волноводе равна удвоенной фазовой скорости электромагнитной волны в свободном пространстве с тем же значением  $\epsilon$ . Диаметр волновода  $d$ , частота колебаний  $f$ .

N	d , мм	f , ГГц	N	d , мм	f , ГГц
1	50	3	6	40	4
2	48	3.2	7	38	4.2
3	46	3.4	8	36	4.4
4	44	3.6	9	34	4.6
5	42	3.8	0	32	4.8

Литература: [1] , с.73-81.

### Вариант 5

**Задача 5.1.** Антенна в виде элементарного электрического диполя находится на искусственном спутнике Земли. Спутник располагается на высоте  $h$  от плоской поверхности Земли. Максимум диаграммы направленности антенны ориентирован в точку, находящуюся на поверхности Земли и удаленную от спутника на расстояние  $r$ . Определить, под каким меридианальным углом к оси диполя будет видна точка на поверхности Земли, удаленная от спутника на расстояние  $h$ , если спутник и обе точки на поверхности Земли лежат в одной меридианальной плоскости, а над поверхностью Земли находится вакуум.

N	h , км	r , км	N	h , км	r , км
1	100	1000	6	200	900
2	120	980	7	220	880
3	140	960	8	240	860
4	160	940	9	260	840

5	180	920	0	280	820
---	-----	-----	---	-----	-----

Литература: [1], с.46.

**Задача 5.2.** Определить, как будут отличаться величины критической длины волны, длины волны в волноводе, фазовой и групповой скоростей в полом прямоугольном металлическом волноводе с размерами  $a \times b$ , если внутри волновода находится вакуум, волновод работает на волне  $H_{10}$  и  $E_{11}$  при частоте генератора  $f$ .

N	a, мм	b, мм	f, МГц	N	a, мм	b, мм	f, МГц
1	23	10	10000	6	28	15	9500
2	24	11	9900	7	29	16	9400
3	25	12	9800	8	30	17	9300
4	26	13	9700	9	31	18	9200
5	27	14	9600	0	32	19	9100

Литература: [1], с.57-73.

### **Работа №2. Методические указания к выполнению работы**

Учебным планом по дисциплине «Электродинамика и распространение радиоволн» (часть 2 - распространение радиоволн) предусмотрено выполнение одной контрольной работы, состоящей из двух задач.

Номера задач в контрольной работе студент выбирает по предпоследней цифре своего шифра (см. табл.).

Цифра шифра	1 или 6	2 или 7	3 или 8	4 или 9	5 или 0
Задачи	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Задачи	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5

Каждая задача имеет десять вариантов числовых данных. Номер варианта числовых данных каждой задачи должен совпадать с последней цифрой шифра студента.

При решении задач все величины должны быть выражены в Международной системе единиц (СИ).

Типичные ошибки, допускаемые студентами при выполнении контрольных работ:

- 1) использование различных систем единиц;
- 2) использование относительной диэлектрической и магнитной проницаемостей вместо их абсолютных значений;
- 3) использование неверных единиц измерения для величин: напряжённости электрического и магнитного полей, индукции электрического и магнитного полей и т. д.;
- 4) арифметические ошибки при выполнении вычислений.

**При решении задач 1.1÷1.5** следует использовать формулы, характеризующие процесс распространения радиоволн в свободном пространстве, а

именно: для действительной амплитуды  $E_m = \frac{\sqrt{60P_{изл} D_{изл}}}{r_1}$  в точке наблюд-

ения, для принимаемой мощности  $P_{пр} = \frac{P_{изл} D_{изл} D_{пр} \lambda^2}{(4\pi r_1)^2}$ , для потерь передачи

$$L = \frac{P_{пр}}{P_{изл}} = \frac{D_{изл} D_{пр} \lambda^2}{(4\pi r_1)^2}, \text{ для эффективной площади антенны } A_{эфф} = \frac{D \cdot \lambda^2}{4\pi}.$$

**Задача 1.1.** Организовать линию радиосвязи между двумя самолётами в стратосфере и определить ее протяжённость  $r_1$  и мощность  $P_{пр}$  на входе приёмной антенны, полагая, что радиосвязь должна осуществляться на волне  $\lambda$ , из-

лучаемая передающей антенной мощность должна быть равна  $P_{изл}$ , максимальные значения коэффициентов направленного действия передающей и приёмной антенн равны  $D$ , а потери передачи на линии радиосвязи равны  $L$ .

Номер варианта	$\lambda$ , см	$P_{изл}$ , Вт	$D$	$L_{пот}$ , дБ
0	10	1	100	50
1	15	2	105	55
2	20	3	110	60
3	25	4	115	65
4	30	5	120	70
5	35	6	125	75
6	40	7	130	80
7	45	8	135	85
8	50	9	140	90
9	55	10	150	95

Литература: [2], с.4-12.

**Задача 1.2.** Организовать линию радиосвязи между двумя летательными аппаратами в вакууме и определить длину  $\lambda$  электромагнитной волны и мощность  $P_{пр}$  на входе приёмной антенны, полагая, что протяжённость линии ра-

диосвязи должна быть равна  $r_1$ , излучаемая передающей антенной мощность -  $P_{изл}$ , максимальные значения коэффициентов направленного действия передающей и приёмной антенн равны D, а потери передачи на линии радиосвязи -  $L_{пот}$ .

Номер варианта	$r_1$ , км	$P_{изл}$ , кВт	D	$L_{пот}$ , дБ
0	10	0,10	100	50
1	15	0,12	105	55
2	20	0,13	110	60
3	25	0,14	115	65
4	30	0,15	120	70
5	35	0,16	125	75
6	40	0,17	130	80
7	45	0,18	135	85
8	50	0,19	140	90
9	55	0,20	150	95

Литература: [2], с.4-12.

**Задача 1.3.** Организовать линию радиосвязи между двумя космическими кораблями и определить: величину  $E_m$  напряжённости электрического поля на

входе приёмной антенны, величины  $A_{эфф}$  эффективных площадей приёмной и передающей антенн и мощность  $P_{пр}$  на входе приёмной антенны. При этом протяжённость линии радиосвязи должна быть равна  $r_1$ , излучаемая передающей антенной мощность -  $P_{изл}$ , максимальные значения коэффициентов направленного действия передающей и приёмной антенн равны D, а длина электромагнитной волны -  $\lambda$ .

Номер варианта	$r_1$ , км	$P_{изл}$ , Вт	D	$\lambda$ , см
0	10	1,0	100	1,0
1	15	1,5	100	1,5
2	20	2,0	105	2,0
3	25	2,5	110	2,5
4	30	3,0	115	3,0
5	35	3,5	120	3,5
6	40	4,0	125	4,0
7	45	4,5	130	4,5
8	50	5,0	135	5,0
9	55	5,5	140	5,5

Литература: [2], с.4-12.

**Задача 1.4.** Организовать линию радиосвязи между двумя самолётами в свободном пространстве и определить: максимальные значения  $D$  коэффициентов направленного действия передающей и приёмной антенн, полагая их равными; величину  $E_m$  напряжённости электрического поля на входе приёмной антенны, величины  $A_{эфф}$  эффективных площадей приёмной и передающей антенн и мощность  $P_{пр}$  на входе приёмной антенны, полагая, что протяжённость линии радиосвязи должна быть равна  $r_1$ , излучаемая передающей антенной мощность должна быть равна  $P_{изл}$ , длина электромагнитной волны равна  $\lambda$ , а потери передачи на линии радиосвязи равны  $L_{ном}$ .

Номер варианта	$r_1$ , км	$P_{изл}$ , Вт	$L_{ном}$ , дБ	$\lambda$ , см
0	10	1,0	50	1,0
1	15	1,5	55	1,5
2	20	2,0	60	2,0
3	25	2,5	65	2,5
4	30	3,0	70	3,0
5	35	3,5	75	3,5
6	40	4,0	80	4,0
7	45	4,5	85	4,5

8	50	5,0	90	5,0
9	55	5,5	95	5,5

Литература: [2], с. 4-12.

**Задача 1.5.** Организовать линию радиосвязи между двумя летательными аппаратами в свободном пространстве и определить: длину  $\lambda$  электромагнитной волны; величину  $E_m$  напряжённости электрического поля на входе приёмной антенны; величины  $A_{эфф}$  эффективных площадей приёмной и передающей антенн и мощность  $P_{пр}$  на входе приёмной антенны, полагая, что протяжённость линии радиосвязи должна быть равна  $r_1$ , излучаемая передающей антенной мощность должна быть равна  $P_{изл}$ , максимальные значения коэффициентов направленного действия передающей и приёмной антенн равны D, а потери передачи на линии радиосвязи равны  $L_{пот}$ .

Номер варианта	$r_1$ , км	$P_{изл}$ , Вт	$L_{пот}$ , дБ	D
0	5	0,5	50	10
1	10	1,0	55	15
2	15	1,5	60	20
3	20	2,0	65	25
4	25	2,5	70	30

5	30	3,0	75	35
6	35	3,5	80	40
7	40	4,0	85	45
8	45	4,5	90	50
9	50	5,0	95	55

Литература: [2], с. 4-12.

При решении задач 2.1÷2.5 следует использовать формулы, характеризующие процесс распространения радиоволн вблизи плоской и сферической поверхности Земли, а именно: квадратичную формулу

$$E_{mB} \approx \frac{\sqrt{60P_{изл} D_{изл}}}{r_1^2} \cdot \frac{4\pi \cdot h_{изл} \cdot h_{np}}{\lambda},$$

формулы инженерного метода приведённых высот

$$h'_{изл} = h_{изл} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r_1}{R_B} \right)^2 \right],$$

$$h'_{np} = h_{np} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r_1}{R_B} \right)^2 \right];$$

$$R_B = \sqrt{2a} \cdot \left( \sqrt{h_{изл}} + \sqrt{h_{np}} \right); a = 6370 \text{ км};$$

формулы инженерного метода эквивалентного радиуса Земли

$$a_э = \frac{4}{3} \cdot a \approx 8500 \text{ км},$$

$$R_B = \sqrt{2a_э} \cdot \left( h_{изл} + h_{np} \right),$$

$$\lambda_{mp} = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad \varepsilon = 1,00059.$$

**Задача 2.1.** Организовать линию радиосвязи между пунктами передачи и приёма, расположенными в однородной тропосфере вблизи гладкой сферической поверхности Земли, выбрав расстояние  $R_1$  от выхода передающей антенны до входа приёмной антенны так, чтобы линия радиосвязи находилась в освещённой области, и можно было бы применить квадратичную формулу. Считать, что выход передающей антенны должен находиться на высоте  $h_{изл}$ , вход приёмной антенны – на высоте  $h_{пр}$  от гладкой сферической поверхности Земли. Максимальное значение коэффициента направленного действия передающей и приемной антенн должно быть равно  $D_{изл}$ , излучаемая передающей антенной мощность должна быть равна  $P_{изл}$ , длина электромагнитной волны должна быть равна  $\lambda$ . Требуется определить величину  $E_{пр}$  амплитуды вектора напряжённости гармонического электромагнитного поля на входе приёмной антенны, воспользовавшись инженерным методом приведённых высот. Расчёт произвести вначале с учётом сферичности Земли, а затем без учёта сферичности Земли, считая, что выход передающей антенны находится на высоте  $h_{изл}$ , а вход приёмной антенны находится на высоте  $h_{пр}$  от гладкой плоской поверхности Земли, и сравнить результаты указанных двух случаев.

Номер варианта	$D_{изл}$	$h_{пр}, \text{ м}$	$h_{изл}, \text{ м}$	$\lambda, \text{ м}$	$P_{пер}, \text{ кВт}$
0	10	28	100	1	1,0
1	12	26	105	2	1,2

2	13	24	110	3	1,3
3	14	22	115	4	1,4
4	15	20	120	5	1,5
5	16	18	125	6	1,6
6	17	16	130	7	1,7
7	18	14	135	8	1,8
8	19	12	140	9	1,9
9	20	10	1459	10	2,0

Литература: [2], с.17-41.

**Задача 2.2.** Организовать линию радиосвязи между двумя кораблями, расположенными в тропосфере с нормальной тропосферной рефракцией вблизи гладкой сферической поверхности Земли, выбрав расстояние  $r_1$  от выхода передающей антенны до входа приёмной антенны так, чтобы линия радиосвязи находилась в освещённой области, и чтобы для расчёта линии радиосвязи можно было бы применить квадратичную формулу. Считать, что выход передающей антенны должен находиться на высоте  $h_{изл}$ , вход приёмной антенны должен находиться на высоте  $h_{пр}$  от гладкой сферической поверхности Земли. Максимальное значение коэффициента направленного действия передающей антенны должно быть равно  $D_{изл}$ , излучаемая передающей антенной мощность должна быть равна  $P_{изл}$ , длина электромагнитной волны должна быть равна  $\lambda$ . Требуется определить величину  $E_{пр}$  амплитуды вектора напряжённости гармонического электромагнитного поля на входе приёмной антенны, воспользо-

вавшись инженерными методами приведённых высот и эквивалентного радиуса Земли. Расчёт произвести вначале с учётом сферичности Земли, но без учёта нормальной тропосферной рефракции, а затем учесть влияние тропосферной рефракции и сравнить результаты указанных двух случаев.

Номер варианта	$D_{изл}$	$h_{np}$ , м	$h_{изл}$ , м	$\lambda$ , м	$P_{пер}$ , кВт
0	15	9	19	0,1	0,10
1	20	10	18	0,2	0,12
2	25	11	17	0,3	0,13
3	30	12	16	0,4	0,14
4	35	13	15	0,5	0,15
5	40	14	14	0,6	0,16
6	45	15	13	0,7	0,17
7	50	16	12	0,8	0,18
8	55	17	11	0,9	0,19
9	60	18	10	1,0	0,20

Литература: [2], с.17-60.

**Задача 2.3.** Организовать линию сотовой радиосвязи между пользователями радиотелефонов (ПТ) и базовыми приёмопередающими станциями (БС), расположенными в однородной тропосфере вблизи гладкой сферической поверхности Земли, выбрав расстояние  $R_1$  между антеннами ПТ и БС так, чтобы линия радиосвязи находилась в освещённой области, и чтобы для расчёта линии радиосвязи можно было бы применить квадратичную формулу. Считать,

что выход передающей и вход приёмной антенны ПТ должен находиться на высоте  $h_{nm}$ , выход передающей и вход приёмной антенны БС должен находиться на высоте  $h_{bc}$  от гладкой сферической поверхности Земли. Передающей и приёмной антеннами ПТ и БС являются элементарные электрические вибраторы; излучаемая передающей антенной ПТ мощность равна  $P_{nm}$ , излучаемая передающей антенной БС мощность равна  $P_{bc}$ ; рабочая частота на линии радиосвязи равна  $f$ , а относительная диэлектрическая проницаемость тропосферы равна  $\varepsilon = 1,00029$ . Требуется определить: величину  $E_{nm}$  амплитуды вектора напряжённости гармонического электромагнитного поля, создаваемого БС, на входе приёмной антенны ПТ, а также величину  $E_{bc}$  амплитуды вектора напряжённости гармонического электромагнитного поля, создаваемого ПТ, на входе приёмной антенны БС, воспользовавшись инженерным методом приведённых высот. Расчёт произвести вначале с учётом сферичности Земли, а затем без учёта сферичности Земли, считая, что антенны находятся на высотах  $h_{nm}$  и  $h_{bc}$  от гладкой плоской поверхности Земли, и сравнить результаты указанных двух случаев.

Номер варианта	$f$ , МГц	$h_{nm}$ , м	$h_{bc}$ , м	$P_{nm}$ , Вт	$P_{bc}$ , Вт
0	900	0,5	15	0,8	35
1	1800	0,7	17	2,0	40
2	900	0,9	19	5,0	45
3	1800	1,1	20	0,8	50

4	900	1,2	22	2,0	55
5	1800	1,3	24	5,0	60
6	900	1,4	26	0,8	65
7	1800	1,5	28	2,0	70
8	900	1,6	30	5,0	75
9	1800	1,7	32	0,8	80

Литература: [2], с.17-41.

**Задача 2.4.** Организовать линию телевизионной связи между пунктами передачи и приёма, расположенными в однородной тропосфере вблизи гладкой сферической поверхности Земли, выбрав расстояние  $r_1$  от выхода передающей антенны до входа приёмной антенны так, чтобы линия телевизионной радиосвязи находилась в освещённой области, и чтобы для расчёта линии телевизионной радиосвязи можно было бы применить квадратичную формулу. Считать, что выход передающей антенны должен находиться на высоте  $h_{изл}$ , вход приёмной антенны должен находиться на высоте  $h_{пр}$  от гладкой сферической поверхности Земли. Максимальное значение коэффициента направленного действия передающей антенны -  $D_{изл}$ , длина электромагнитной волны -  $\lambda$ . Требуется определить величину излучаемой передающей антенной мощности  $P_{изл}$ , если амплитуда вектора напряжённости гармонического электромагнитного поля на входе приёмной антенны должна быть равна  $E_{пр}$ . Расчёт произвести вначале с учётом сферичности Земли, воспользовавшись инженерным методом приведённых высот, а затем без учёта сферичности Земли, считая, что выход передающей антенны находится на высоте  $h_{изл}$ , а вход приёмной антенны находит-

ся на высоте  $h_{np}$  от гладкой плоской поверхности Земли, и сравнить результаты указанных двух случаев.

Номер варианта	$D_{изл}$	$h_{np}$ , м	$h_{изл}$ , м	$\lambda$ , м	$E_{np}$ , мкВ
0	20	5	95	6,03	80
1	23	6	90	5,06	81
2	26	7	85	3,88	82
3	29	8	80	3,51	83
4	32	9	75	3,22	84
5	35	10	70	1,71	85
6	38	11	65	1,64	86
7	42	12	60	1,57	87
8	45	137	55	1,50	88
9	50	14	50	1,45	89

Литература: [2], с.17-41.

**Задача 2.5.** Организовать линию радиорелейной связи между двумя ретрансляционными пунктами передачи и приёма, расположенными в тропосфере с нормальной тропосферной рефракцией вблизи гладкой сферической поверхности Земли. Расстояние  $R_1$  от выхода передающей антенны до входа приёмной антенны выбрать так, чтобы линия радиорелейной связи находилась в освещённой области, и чтобы для расчёта линии радиорелейной связи можно было бы применить квадратичную формулу. Считать, что выход передающей

антенны находится на высоте  $h_{изл}$ , вход приёмной антенны – на высоте  $h_{пр}$  от гладкой сферической поверхности Земли. Максимальное значение коэффициента направленного действия передающей антенны должно быть равно  $D_{изл}$ , излучаемая передающей антенной мощность должна быть равна  $P_{изл}$ , длина электромагнитной волны должна быть равна  $\lambda$ . Требуется определить величину  $E_{пр}$  амплитуды вектора напряжённости гармонического электромагнитного поля на входе приёмной антенны, воспользовавшись инженерными методами приведённых высот и эквивалентного радиуса Земли. Расчёт произвести вначале с учётом сферичности Земли, но без учёта нормальной тропосферной рефракции, а затем учесть влияние тропосферной рефракции и сравнить результаты указанных двух случаев.

Номер варианта	$D_{изл}$	$h_{пр}$ , м	$h_{изл}$ , м	$\lambda$ , см	$P_{изл}$ , Вт
0	20	10	11	15	12
1	25	6	6	7,5	6
2	30	5	5	5,0	3,5
3	35	4	5	3,75	2,5
4	40	3,5	4,5	2,72	1,0
5	25	5	6	7,5	1,2
6	35	4,5	5,5	3,75	0,6
7	30	4	5	5,0	0,7
8	20	9	10	15	12,5

9	25	5,5	6,5	7,5	1,2
---	----	-----	-----	-----	-----

Литература: [2], с.17-60.

### 4.3. Тесты тренировочные

Раздел 1, тема 1.1 (см. Тематический план)

#### Тест № 1

**1. Физическими величинами, полностью характеризующими электромагнитное поле, являются векторы:**

- А. магнитной индукции и напряженности электрического поля;
- В. поляризации и намагничивания;
- С. Герца и Пойнтинга.

**2. Физическими величинами, полностью характеризующими электрически заряженные частицы вещества, являются:**

- А. Объемная плотность электрического заряда и поверхностная плотность электрического тока;
- В. Величина электрического заряда;
- С. Величина и направление электрического тока.

**3. В макроскопической теории электромагнитного поля материальную среду – вакуум полностью характеризуют:**

- А. Электрическая и магнитная постоянные вакуума;
- В. Электромагнитное поле в вакууме;
- С. Гравитационное поле в вакууме.

**4. Электрический заряд – это свойство частиц вещества, характеризующее их способность:**

- А. Создавать собственное электромагнитное поле и взаимодействовать с внешним электромагнитным полем;
- В. Притягиваться друг к другу;
- С. Отталкиваться друг от друга.

**5. Силовое воздействие, оказываемое электромагнитным полем на электрически заряженные частицы вещества, полностью определяется:**

- A. Законом Лорентца;
- B. законом Кулона;
- C. Законом Ома.

## Раздел 1, тема 1.2

### Тест № 2

**1. Первое уравнение Максвелла является дифференциальной формой записи физического закона:**

- A. Полного тока;
- B. Электромагнитной индукции;
- C. Гаусса.

**2. Второе уравнение Максвелла является дифференциальной формой записи физического закона:**

- A. Электромагнитной индукции;
- B. Гаусса;
- C. Био-Савара.

**3. Третье уравнение Максвелла является дифференциальной формой записи физического закона:**

- A. Гаусса;
- B. Остроградского – Гаусса;
- C. Полного тока.

**4. Четвертое уравнение Максвелла является дифференциальной формой записи физического закона:**

- A. Непрерывности силовых линий вектора магнитной индукции;
- B. Полного тока;
- C. Электромагнитной индукции.

**5. Уравнения Максвелла называют физическими аксиомами, так как из них могут быть получены:**

- A. Все основные законы классической электродинамики;
- B. Законы Кирхгофа;
- C. Законы Кулона и Ома.

## Раздел 1, тема 1.3

### Тест № 3

**1. Энергетические характеристики электромагнитного поля описываются с помощью:**

- А. Теоремы Умова-Пойнтинга;
- В. Закона сохранения энергии;
- С. Уравнения непрерывности.

**2. Вектор Пойнтинга определяет:**

- А. Величину и направление потока электромагнитной энергии;
- В. Объемную плотность электромагнитной энергии;
- С. Тепловые потери электромагнитной энергии в проводящей среде.

**3. Вектор Пойнтинга равен:**

- А. Векторному произведению векторов напряженности электрического и магнитного полей;
- В. Скалярному произведению векторов напряженности электрического и магнитного полей;
- С. Произведению векторов электрической и магнитной индукции.

**4. Вектор Пойнтинга направлен:**

- А. Перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы напряженности электрического и магнитного полей;
- В. Перпендикулярно вектору напряженности электрического поля;
- С. Перпендикулярно вектору напряженности магнитного поля.

**5. Источниками энергии электромагнитного поля являются:**

- А. Электрически заряженные частицы вещества;
- В. Магнитные заряды;
- С. Электронейтральные частицы вещества.

## Раздел 1, тема 1.4

### Тест № 4

**1. Волновые уравнения это:**

- А. Дифференциальные уравнения второго порядка в частных производ-

ных;

- В. Дифференциальные уравнения первого порядка;
- С. Дифференциальные уравнения в частных производных.

**2. Волновые уравнения для векторов электромагнитного поля в вакууме содержат:**

- А. Вторые производные по координатам пространства и по времени;
- В. Первые производные по координатам пространства и по времени;
- С. Вторые производные по координатам пространства и первые производные по времени.

**3. В электродинамике используют следующие потенциалы электромагнитного поля:**

- А. Скалярный, векторный, вектор Герца;
- В. Положительный и отрицательный;
- С. Поляризационный и намагничивания.

**4. Векторное, волновое, неоднородное, обобщенное уравнение записывается для представления:**

- А. Векторных электромагнитных полей в средах с проводимостью, созданных системой реальных источников;
- В. Векторных электромагнитных полей в диэлектрике;
- С. Векторных электромагнитных полей в средах с проводимостью при отсутствии источников поля.

**5. Для нахождения векторов напряженности электрического и магнитного поля с помощью векторного волнового уравнения необходимо в общем случае решить:**

- А. Шесть скалярных волновых уравнений;
- В. Три скалярных волновых уравнения;
- С. Четыре скалярных волновых уравнения.

**Раздел 1, тема 1.5**

**Тест № 5**

**1. Система уравнений Максвелла преобразуется в уравнения для**

**статических полей:**

А. При отсутствии движения зарядов и равенстве нулю всех производных по времени;

В. При отсутствии токов проводимости;

С. При отсутствии токов смещения.

**2. Система уравнений Максвелла преобразуется в уравнения для стационарных полей:**

А. При наличии токов проводимости и отсутствии изменений во времени;

В. При наличии токов смещения;

С. При наличии переменных токов.

**3. Вихревыми принято называть электромагнитные поля, при описании которых:**

А. Ротор любого из векторов отличен от нуля, а дивергенция этого вектора равна нулю;

В. Дивергенция любого из векторов отлична от нуля, а ротор этого вектора равен нулю;

С. Ротор любого из векторов отличен от нуля.

**4. Потенциальными принято называть электромагнитные поля, при описании которых:**

А. Ротор любого из векторов равен нулю, а дивергенция этого вектора отлична от нуля;

В. Дивергенция любого из векторов равна нулю;

С. Ротор любого из векторов отличен от нуля.

**5. Волновое уравнение для вектора напряженности электрического поля в случае статических полей превращается в:**

А. Уравнение Лапласа либо Пуассона;

В. Уравнение Даламбера;

С. Уравнение Гельмгольца.

**Раздел 2, тема 2.1**

## Тест № 6

**1. Все задачи электродинамики подразделяются на:**

- A. Внутренние и внешние задачи;
- B. Задачи на определение полей в линиях передачи и объемных резонаторах;
- C. Задачи на определение полей излучения в произвольных средах.

**2. Решение электродинамической задачи является единственным, если оно удовлетворяет:**

- A. Начальным и граничным условиям;
- B. Условию Зоммерфельда;
- C. Граничным условиям.

**3. К строгим методам решения задач электродинамики относятся методы:**

- A. Разделения переменных, запаздывающих потенциалов, скалярного и векторного интегралов Кирхгофа;
- B. Разделения переменных, краевых волн, геометрической теории дифракции;
- C. Запаздывающих потенциалов, краевых волн, геометрической оптики.

**4. Метод разделения переменных при решении задач электродинамики применяется:**

- A. В любых ортогональных системах координат;
- B. В декартовой и сферической системах координат;
- C. В прямоугольной и цилиндрической системах координат.

**5. Метод запаздывающих потенциалов основывается на:**

- A. Конечной скорости распространения электромагнитных волн в среде;
- B. Волновом характере электромагнитного поля в среде;
- C. Законе сохранения энергии электромагнитного поля в среде.

## Раздел 2, тема 2.2

### Тест № 7

**1. Выражение для плоской электромагнитной волны получают в ре-**

**зультате решения волнового уравнения в:**

- A. Декартовой системе координат;
- B. Сферической системе координат;
- C. Цилиндрической системе координат.

**2. В плоской однородной гармонической электромагнитной волне:**

- A. Плоскости равных фаз совпадают с плоскостями равных амплитуд;
- B. Поверхности равных фаз – параллельные плоскости;
- C. Поверхности равных амплитуд – параллельные плоскости.

**3. При распространении плоской однородной гармонической электромагнитной волны в идеальном диэлектрике:**

- A. Амплитуды векторов поля не изменяются с расстоянием;
- B. Фазы векторов поля не изменяются с расстоянием;
- C. Амплитуды и фазы векторов поля изменяются с расстоянием.

**4. В электродинамике плоскостью поляризации электромагнитной волны называется плоскость, в которой расположены векторы:**

- A. Пойнтинга и электрической напряженности поля;
- B. Пойнтинга и магнитной индукции поля;
- C. Магнитной индукции и электрической напряженности поля.

**5. Поляризационные характеристики электромагнитной волны могут быть описаны с помощью:**

- A. Коэффициента эллиптичности и угла наклона большой оси эллипса к одной из координатных осей декартовой системы координат;
- B. Фиксации положения большой и малой осей эллипса относительно полярной системы координат;
- C. Определения величины отношения малой и большой осей эллипса.

## **Раздел 2, тема 2.3**

### **Тест № 8**

**1. В сферической волне амплитуда поля убывает пропорционально:**

- A. Первой степени расстояния;
- B. Квадрату расстояния;

С. Корню квадратному из расстояния.

**2. Электрический диполь (излучатель) называется элементарным если:**

А. Его геометрические размеры (длина) много меньше длины излучаемой им электромагнитной волны;

В. Его длина много меньше расстояния до точки наблюдения;

С. Длина излучаемой им электромагнитной волны много меньше расстояния до точки наблюдения.

**3. В поле, излучаемом элементарным электрическим диполем, в зависимости от расстояния выделяют:**

А. Ближнюю, промежуточную и дальнюю зоны;

В. Зоны индукции и излучения;

С. Зоны Фраунгофера и Френеля.

**4. Характеристики излучения элементарного электрического диполя полностью определяются:**

А. Сопротивлением излучения, мощностью излучения, функцией направленности;

В. Диаграммой направленности и коэффициентом направленного действия;

С. Коэффициентом направленного действия и мощностью излучения.

**5. Выражение для поля излучения элементарного магнитного диполя может быть получено с помощью:**

А. Принципа перестановочной двойственности уравнений Максвелла;

В. Теоремы взаимности;

С. Принципа суперпозиции.

## Раздел 2, тема 2.4

### Тест № 9

**1. В электродинамике в общем случае неоднородными средами называют среды, в которых:**

А. Диэлектрическая, магнитная проницаемости и удельная электропро-

водность зависят от координат точки наблюдения;

В. Относительная диэлектрическая проницаемость и удельная электропроводность изменяется в пространстве;

С. Относительная магнитная проницаемость изменяется в пространстве.

**2. Плоскостью падения электромагнитной волны на плоскую границу раздела сред с различными радиофизическими параметрами называют плоскость, в которой лежат:**

А. Вектор Пойнтинга падающей волны и нормаль к границе раздела, восстановленная в точке падения;

В. Вектор Пойнтинга и вектор напряженности электрического поля падающей электромагнитной волны;

С. Вектор Пойнтинга и вектор напряженности магнитного поля падающей электромагнитной волны.

**3. Поляризация электромагнитной волны, падающей на плоскую границу раздела сред определяется относительно:**

А. Плоскости падения;

В. Границы раздела сред;

С. Линии горизонта.

**4. При падении плоской электромагнитной волны круговой поляризации на плоскую границу раздела сред под углом Брюстера отраженная волна будет иметь:**

А. Перпендикулярную поляризацию;

В. Круговую поляризацию;

С. Эллиптическую поляризацию.

**5. При переходе плоской волны из оптически менее в оптически более плотную среду угол преломления:**

А. Меньше угла падения;

В. Равен углу падения;

С. Больше угла падения.

### Раздел 3, тема 3.1

## Тест № 10

**1. В полых металлических волноводах могут распространяться электромагнитные волны следующих типов:**

- A. Поперечные электрические и поперечные магнитные;
- B. Поперечные электромагнитные;
- C. Плоские и сферические.

**2. Физический смысл термина поперечные электрические волны состоит в том, что вектор напряженности электрического поля электромагнитной волны:**

- A. Имеет проекцию на направление продольной оси волновода;
- B. Лежит в плоскости поперечного сечения волновода;
- C. Имеет проекции на все координатные оси...

**3. Электромагнитная волна может распространяться в волноводе, если ее длина:**

- A. Меньше критической длины волны волновода;
- B. Равна критической длине волны волновода;
- C. Больше критической длины волны волновода.

**4. Длина распространяющейся в волноводе электромагнитной волны:**

- A. Больше длины волны, созданной генератором (излучателем);
- B. Равна длине волны, созданной генератором;
- C. Меньше длины волны, созданной генератором.

**5. Критическая длина волны основного типа в прямоугольном, полом металлическом волноводе, имеющем размер широкой стенки  $a$ , равна:**

- A.  $2a$ ;
- B.  $a$ ;
- C.  $0.5a$ .

Раздел 3, тема 3.2

## Тест № 11

**1. Длинными линиями в электродинамике принято называть линии, физическая длина которых:**

- А. Много больше длины распространяющейся электромагнитной волны;
- В. Сравнима с длиной распространяющейся электромагнитной волны;
- С. Меньше длины распространяющейся электромагнитной волны.

**2. В проводных линиях передачи распространяются электромагнитные волны:**

- А. Поперечного типа;
- В. Электрического типа;
- С. Магнитного типа.

**3. В коаксиальных линиях передачи основным типом распространяющихся электромагнитных волн являются волны:**

- А. Поперечного типа;
- В. Электрического типа;
- С. Магнитного типа.

**4. Потери электромагнитной энергии в коаксиальных линиях передачи определяются:**

- А. Потерями в диэлектрике и проводниках;
- В. Потерями на излучение энергии в пространство;
- С. Потерями в диэлектрике и на излучение.

**5. Коэффициент бегущей волны в длинной линии показывает:**

А. В каком из возможных режимов (бегущих, стоячих, смешанных волн) работает линия;

- В. Что по длинной линии распространяется электромагнитная волна;
- С. Что имеют место потери энергии в длинной линии.

## Раздел 3, тема 3.3

### Тест № 12

**1. Объемный резонатор это:**

- А. Колебательный контур в диапазоне сверх высоких частот;

В. Катушка индуктивности в диапазоне сверх высоких частот;

С. Распределенная емкость в диапазоне сверх высоких частот.

**2. В диапазоне сверх высоких частот объемные резонаторы, как правило, представляют собой:**

А. Коротко замкнутые с обеих сторон отрезки длинных линий;

В. Отрезки волноводов;

С. Комбинации длинных линий и элементов с сосредоточенными индуктивностями и емкостями.

**3. Основными характеристиками объемных резонаторов являются:**

А. Резонансная частота и добротность;

В. Ширина полосы пропускания;

С. Величина потерь энергии.

**4. В качестве элементов возбуждения объемных резонаторов могут быть использованы:**

А. Штыревые, петлевые и щелевые элементы связи;

В. Штыревые и щелевые элементы связи;

С. Петлевые и щелевые элементы связи.

**5. Добротность резонатора тем выше, чем:**

А. Уже полоса пропускания резонатора;

В. Выше резонансная частота;

С. Выше резонансная частота и шире полоса пропускания.

## Раздел 4, тема 4.1

### Тест № 13

**1. Радиоволнами называют электромагнитные волны, занимающие на бесконечной шкале частот диапазон:**

А. От  $10^{-3}$  до  $10^{15}$  Гц;

В. От  $10^3$  до  $10^{12}$  Гц;

С. От  $10^2$  до  $10^{10}$  Гц.

**2. Радиоволны могут распространяться как:**

А. Земные (поверхностные), ионосферные (пространственные), тропо-

сферные и прямые;

В. Тропосферные и ионосферные;

С. Поверхностные и пространственные.

**3. В каждой радиолинии обязательно присутствует:**

А. Передатчик (с передающей антенной), среда распространения радиоволн, приемник (с приемной антенной);

В. Передатчик и приемник;

С. Электромагнитное поле и среда распространения радиоволн.

**4. В зависимости от способа введения информации принято различать:**

А. Первичные и вторичные радиолинии;

В. Радиовещательные и телевизионные радиолинии;

С. Радиолинии радиосвязи и радионавигации.

**5. В теории распространения радиоволн под свободным пространством понимают:**

А. Вакуум (однородную, безграничную, непоглощающую среду, относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости которой равны единице);

В. Пространство, свободное от различных объектов;

С. Области, удаленные от Земли (космическое пространство).

## **Раздел 4, тема 4.2**

### **Тест № 14**

**1. Амплитуда вектора напряженности электрического поля в точке приема в свободном пространстве зависит от расстояния  $r$  между корреспондентами:**

А. Обратно пропорционально  $r$ ;

В. Прямо пропорционально  $r$ ;

С. Обрато пропорционально  $r^2$

**2. При распространении радиоволн в свободном пространстве изменение принимаемой мощности по отношению к излучаемой мощности характеризуют:**

А. Коэффициентом потерь передачи  $L = P_{\text{пр}}/P_{\text{изл}}$ ;

В. Коэффициентом направленного действия передающей и приемной антенн;

С. Коэффициентом затухания радиоволн в среде.

**3. Для учета влияния реальной трассы на распространение радиоволн вводят понятие:**

А. Множителя ослабления поля свободного пространства;

В. Потерь передачи;

С. Коэффициента затухания.

**4. Решение задачи о размерах и форме области пространства, эффективно участвующей в процессе передачи энергии между корреспондентами может быть получено с помощью:**

А. Принципа Гюйгенса-Френеля;

В. Уравнения идеальной радиосвязи;

С. Метода геометрической оптики.

**5. Зоны Френеля в пространстве ограничены:**

А. Эллипсоидами вращения;

В. Сферическими поверхностями;

С. Цилиндрическими поверхностями.

## Раздел 4, тема 4.3

### Тест № 15

**1. Наиболее строго влияние поверхности Земли на распространение радиоволн может быть учтено с помощью:**

А. Дифракционной формулы В.А. Фока;

В. Формулы Б.А. Введенского;

С. Интерференционной формулы.

**2. Влияние кривизны поверхности Земли на величину множителя ослабления может быть учтено с помощью:**

А. Метода приведенных высот;

В. Метода зеркальных отображений;

С. Метода геометрической теории дифракции.

**3. Расчет множителя ослабления поля свободного пространства в освещенной области проводят с помощью:**

А. Интерференционной формулы и формулы Б.А. Введенского;

В. Одночленной формулы В.А. Фока;

С. Уравнения идеальной радиосвязи.

**4. Зона, существенная при отражении радиоволн от поверхности Земли, представляет собой:**

А. Эллипс, расположенный на поверхности;

В. Окружность;

С. Кардиоиду.

**5. Береговая рефракция вызывается:**

А. Отклонением фазового фронта волны при переходе через береговую черту;

В. Отражением радиоволны от границы раздела вода-суша;

С. Изменением затухания амплитуды радиоволны при переходе береговой черты.

## Раздел 5, тема 5.1

### Тест № 16

**1. При исследовании влияния атмосферы Земли на распространение радиоволн принято рассматривать:**

А. Три области: тропосферу, стратосферу и ионосферу;

В. Две области: тропосферу и ионосферу;

С. Две области: стратосферу и ионосферу.

**2. В тропосфере Земли содержится значительное количество:**

А. Водяного пара, гидрометеоров и частиц пыли;

В. Свободных электронов и ионов;

С. Свободных электронов и частиц пыли.

**3. Коэффициент преломления радиоволн в тропосфере зависит от:**

А. Атмосферного давления газов, давления водяных паров и абсолютной

температуры тропосферы;

В. Частоты радиоволны;

С. Величины переносимой радиоволной мощности.

**4. Тропосфера в общем случае является:**

А. Неоднородной и нестационарной средой;

В. Неоднородной стационарной средой;

С. Однородной нестационарной средой.

**5. Рефракция радиоволн в тропосфере это:**

А. Искривление траектории радиоволны;

В. Огибание радиоволной препятствий;

С. Отражение и преломление радиоволны в процессе распространения.

## Раздел 5, тема 5.2

### Тест № 17

**1. В ионосфере содержится большое количество:**

А. Свободных электронов и ионов, а также молекул и атомов атмосферных газов;

В. Электрически нейтральных молекул и атомов атмосферных газов;

С. Молекул озона и свободных ионов.

**2. Абсолютная диэлектрическая проницаемость ионосферы:**

А. Меньше диэлектрической постоянной вакуума;

В. Равна диэлектрической постоянной вакуума;

С. Больше диэлектрической постоянной вакуума.

**3. Ионосфера является:**

А. Неоднородной средой;

В. Однородной средой;

С. Неоднородной средой летом, однородной – зимой.

**4. Критической частотой слоя ионосферы для радиоволны, распространяющейся в ионосфере, называют такую частоту, при которой:**

А. Нормально падающий на слой ионосферы луч, полностью от него отражается;

- В. Отражается луч, падающий под углом 45 градусов на слой ионосферы;
- С. Нормально падающий луч проходит сквозь слой ионосферы.

**5. Частоту вращения электронов и ионов вокруг силовых линий магнитного поля Земли называют:**

- А. Гиромангнитной (циклотронной, ларморовской) частотой;
- В. Частотой Ленгмюра;
- С. Фарадеевской частотой.

## **Раздел 6, тема 6.1**

### **Тест № 18**

**1. Работа радиовещательных станций осуществляется на:**

- А. Длинных, средних, коротких и ультракоротких радиоволн;
- В. Метровых и дециметровых радиоволн;
- С. Волнах УКВ ЧМ диапазона.

**2. Наземные телевизионные станции работают в:**

- А. Метровом и дециметровом диапазонах радиоволн;
- В. Коротковолновом и УКВ диапазонах;
- С. Санти- и миллиметровом диапазонах радиоволн.

**3. Радиолокационные станции используют для работы:**

- А. Дециметровый, сантиметровой и миллиметровый диапазоны волн;
- В. Коротковолновый диапазон;
- С. Сантиметровый диапазон.

**4. Связь с космическими объектами осуществляется в диапазоне:**

- А. Сантиметровых и миллиметровых волн;
- В. Оптических волн;
- С. Метровых волн.

**5. Линии связи с объектами, находящимися под водой, работают:**

- А. В диапазоне сверх длинных радиоволн;
- В. В диапазоне средних волн;

С. В диапазоне коротких волн.

## Раздел 6, тема 6.2

### Тест № 19

**1. Для расчета электрической напряженности электромагнитного поля в диапазонах СДВ и ДВ обычно применяют формулу:**

- А. Остина;
- В. Фарадея;
- С. Кулона.

**2. Для обеспечения работы линии связи в диапазоне КВ необходимо:**

- А. Определить максимально применимую (МПЧ) и наименьшую применимую (НПЧ) частоты;
- В. Выбрать местоположение приемной и передающей антенн;
- С. Выбрать высоты расположения антенн.

**3. При распространении радиоволн КВ диапазона на поверхности Земли образуется зона молчания в форме:**

- А. Кольцевой области вокруг передающей антенны;
- В. Круговой области;
- С. Эллипсоидальной поверхности.

**4. При расчете космических линий связи достаточно знать:**

- А. Потери передачи в свободном пространстве;
- В. Коэффициент направленного действия передающей и приемной антенн;
- С. Длину радиоволны и расстояние между корреспондентами.

**5. Для определения зоны уверенного приема программ наземного телевизионного центра необходимо использовать:**

- А. Формулу Б.А. Введенского с учетом приведенных высот передающей и приемной антенн;
- В. Интерференционную формулу;
- С. Одночленную формулу В.А. Фока.

**Внимание! В каждом тестовом задании полный правильный ответ соответствует ответу, приведенному под буквой А.**

**Тесты рубежные (контрольные)**

**Раздел 1**

**Тест 1**

**1. Физической причиной существования электрического тока проводимости является:**

- А. Движение электрически заряженных частиц;
- В. Изменение во времени электрического поля;
- С. Изменение во времени магнитного поля.

**2. Физической причиной появления тока смещения является:**

- А. Изменение во времени электрического поля;
- В. Изменение во времени магнитного поля;
- С. Изменение во времени электрического заряда,

**3. Уравнения Максвелла – физические законы, выраженные в виде математических соотношений между:**

- А. Физическими величинами, характеризующими электромагнитное поле и физическими величинами, характеризующими вещество;
- В. Векторами электромагнитного поля и электрическими зарядами;
- С. Полным током и током смещения.

**4. Второе уравнение Максвелла содержит:**

- А. Математические операторы от векторов магнитной индукции и электрической напряженности;
- В. Векторы напряженности магнитного поля и объемную плотность электрического заряда;
- С. Вектор электрического смещения и магнитную постоянную среды.

**5. Вектор Пойнтинга определяет:**

- A. Величину и направление потока электромагнитной энергии;
- B. Объемную плотность электромагнитной энергии;
- C. Тепловые потери в проводящей среде.

**6. Теорема Умова-Пойнтинга определяет:**

- A. Энергетические характеристики электромагнитного поля в некоторой области пространства;
- B. Тепловые потери электромагнитной энергии в некоторой области пространства;
- C. Долю энергии, излученной за пределы рассматриваемой области пространства.

**7. Калибровочное соотношение связывает между собой:**

- A. Векторный и скалярный потенциалы электромагнитного поля;
- B. Векторы напряженности электрического и магнитного поля;
- C. Векторы электрического смещения и магнитной индукции.

**8. Введение векторного и скалярного потенциалов формально позволяет свести решение электродинамической задачи к решению:**

- A. Четырех скалярных волновых уравнений;
- B. Шести скалярных волновых уравнений;
- C. Трех скалярных волновых уравнений.

**9. Электромагнитное поле в наиболее общем случае:**

- A. Содержит вихревую и потенциальную компоненты;
- B. Является вихревым;
- C. Является потенциальным.

**10. Отличие стационарных полей от статических заключается в существовании в первых:**

- A. Токов проводимости;
- B. Токов смещения;
- C. неподвижных электрических зарядов.

**Раздел 2**

**Тест 2**

**1. Электродинамические задачи на определение полей в металлических волноводах и объемных резонаторах относятся к:**

- A. Внутренним задачам электродинамики;
- B. Внешним задачам электродинамики;
- C. Смешанным задачам электродинамики.

**2. Решение задач электродинамики методами запаздывающих потенциалов и разделения переменных относится к:**

- A. Строгим методам;
- B. Приближенным методам;
- C. Смешанным методам.

**3. Плоская электромагнитная волна в однородной безграничной среде – это:**

- A. Математическая абстракция;
- B. Физическая реальность;
- C. Физическая реальность для ограниченной области пространства.

**4. Поляризация электромагнитной волны определяется пространственно-временной ориентацией:**

- A. Вектора напряженности электрического поля;
- B. Вектора напряженности магнитного поля;
- C. Вектора Умова-Пойнтинга.

**5. В общем случае для описания поляризационных свойств электромагнитного поля используют понятия:**

- A. Линейной и вращающейся поляризации;
- B. Параллельной и перпендикулярной поляризации;
- C. Круговой поляризации.

**6. Элементарный электрический диполь излучает в свободном пространстве:**

- A. Сферическую электромагнитную волну;
- B. Плоскую электромагнитную волну;
- C. Цилиндрическую электромагнитную волну.

**7. Поле излучения элементарного электрического диполя поляризовано:**

- А. Параллельно проводу диполя;
- В. Перпендикулярно проводу диполя;
- С. Параллельно линии горизонта.

**8. Сопротивление излучения элементарного электрического диполя пропорционально:**

- А. Квадрату длины диполя;
- В. Корню квадратному из длины диполя;
- С. Длине диполя.

**9. При падении плоской электромагнитной волны на плоскую границу раздела сред соотношения между углами падения, отражения и преломления определяются:**

- А. Законами Снеллиуса;
- В. Законами Малюса;
- С. Формулами Френеля.

**10. Какую поляризацию будет иметь преломленная волна, если падающая на границу раздела под углом Брюстера волна имеет круговую поляризацию:**

- А. Эллиптическую;
- В. Параллельную;
- С. Перпендикулярную.

### Раздел 3

#### Тест 3

**1. В полых прямоугольных металлических волноводах могут распространяться электромагнитные волны следующих типов:**

- А.  $H_{mn}$  и  $E_{mn}$ ;
- В.  $H_m$  и  $E_m$ ;
- С. ТЕМ.

**2. Основная волна полого прямоугольного металлического волно-**

**вода обозначается как:**

- A.  $H_{10}$ ;
- B.  $H_{11}$ ;
- C.  $E_{01}$ .

**3. Основная волна круглого металлического полого волновода обозначается:**

- A.  $H_{11}$ ;
- B.  $H_{01}$ ;
- C.  $E_{01}$ .

**4. Фазовая скорость волны в волноводе с воздушным заполнением:**

- A. Больше скорости света в свободном пространстве;
- B. Равна скорости света;
- C. Меньше скорости света.

**5. Коэффициент бегущей волны в волноводе показывает:**

- A. В каком из возможных режимов (бегущих, стоячих или смешанных волн) работает волновод;
- B. Что в волноводе соблюдается режим бегущих волн;
- C. Что по волноводу происходит передача электромагнитной энергии.

**6. Полые металлические волноводы являются фильтрами:**

- A. Верхних частот;
- B. Нижних частот;
- C. Полосовыми.

**7. Вектор Пойнтинга волны, распространяющейся по коаксиальной линии передачи, направлен:**

- A. Вдоль линии передачи;
- B. Перпендикулярно линии передачи;
- C. По направлению вектора напряженности электрического поля.

**8. Потери энергии в двух проводной линии передачи увеличиваются при:**

- A. Увеличении расстояния между проводниками;

В. Уменьшении расстояния между проводами;

С. Увеличении длины волны.

**9. Объемный резонатор в цепях сверх высоких частот выполняет функции:**

А. Колебательного контура;

В. Распределенной индуктивности;

С. Распределенной емкости.

**10. Объемные резонаторы с высокой добротностью обычно используются:**

А. В узкополосных радиотехнических устройствах;

В. В широкополосных радиотехнических устройствах;

С. В радиоприемных и радиопередающих устройствах.

## Раздел 4

### Тест 4

**1. Радиорелейная линия связи относится к:**

А. Первичным радиолиниям;

В. Вторичным радиолиниям;

С. Смешанным радиолиниям.

**2. Радиоволны средневолнового диапазона распространяются как:**

А. Поверхностные и пространственные (ионосферные);

В. Прямые;

С. Поверхностные (земные).

**3. Амплитуда вектора напряженности электрического поля в точке приема зависит от коэффициента направленного действия (КНД) передающей антенны:**

А. Пропорционально корню квадратному из КНД;

В. Прямо пропорционально КНД;

С. Обратно пропорционально КНД.

**4. Потери передачи при распространении радиоволн в свободном пространстве зависят от расстояния между корреспондентами:**

- A. Обратно пропорционально квадрату расстояния;
- B. Обратно пропорционально расстоянию;
- C. Обратно пропорционально корню квадратному из расстояния.

**5. С помощью множителя ослабления поля свободного пространства учитывают:**

- A. Влияние реальных условий распространения радиоволн на уровень поля в месте приема;
- B. Уменьшение уровня поля в месте приема за счет расстояния между корреспондентами;
- C. Влияние атмосферы на уровень поля в месте приема.

**6. Интерференционная формула для расчета множителя ослабления используется в:**

- A. Освещенной области пространства;
- B. Области тени;
- C. Области полутени.

**7. Амплитуда вектора напряженности электрического поля определяемая формулой Введенского зависит от расстояния между корреспондентами:**

- A. Обратно пропорционально квадрату расстояния;
- B. Обратно пропорционально расстоянию;
- C. Обратно пропорционально корню квадратному из расстояния.

**8. Расстояние прямой видимости определяет границы:**

- A. Освещенной области пространства и зоны тени;
- B. Зоны полутени и тени;
- C. Освещенной зоны и зоны полутени.

**9. Влияние горных хребтов на распространение радиоволн можно объяснить тем, что эти неровности:**

- A. Перекрывают пространственные зоны Френеля;

- В. Приводят к рефракции радиоволн;
- С. Вызывают интерференцию принимаемого сигнала.

**10. Изменение аргумента множителя ослабления при переходе радиоволной береговой черты приводит к появлению:**

- А. Береговой рефракции;
- В. Интерференции;
- С. Дополнительного ослабления амплитуды поля.

## **Раздел 5**

### **Тест 5**

**1. Атмосфера представляет собой газообразную оболочку Земли, простирающуюся до высоты порядка:**

- А. 20000 км;
- В. 500 км;
- С. 100000 км.

**2. Тропосфера простирается до высот:**

А. Порядка 15 км в районе экватора, 10 – 12 км в средних широтах, 8 км в приполярных районах;

- В. 20 км;
- С. 10 км.

**3. Изменение индекса рефракции тропосферы с высотой вызывает:**

- А. Рефракцию радиоволн;
- В. Интерференцию радиоволн;
- С. Дополнительное ослабление уровня поля.

**4. Флюктуации индекса рефракции в тропосфере вызваны:**

- А. Турбулентным движением воздуха;
- В. Изменением концентрации молекул газа с высотой;
- С. Перепадами температуры с высотой.

**5. Волноводное распространение радиоволн в тропосфере возможно в диапазоне:**

- А. Миллиметровых, сантиметровых и дециметровых волн;

В. Сверхдлинных и длинных волн;

С. Средних и коротких волн.

**6. Ионосфера на освещенной стороне Земли (днем) состоит из:**

А. Четырех слоев с различной электронной концентрацией;

В. Трех слоев;

С. Двух слоев.

**7. Относительная диэлектрическая проницаемость ионосферы становится равной нулю на:**

А. Частоте Ленгмюра (собственной частоте ионосферы):

В. Высоте 100 км;

С. Верхней границе ионосферы.

**8. Гиромангнитная частота ионосферы для электронов равна:**

А. 1,4 МГц;

В. 100 кГц;

С. 4 ГГц.

**9. Критической частотой для радиоволны, распространяющейся в ионосфере, называют частоту, при которой:**

А. Нормально падающий на слой ионосферы луч полностью от него отражается;

В. Падающий под углом 45 градусов луч отражается от слоя ионосферы;

С. Нормально падающий на слой ионосферы луч проходит сквозь этот слой.

**10. Наличие магнитного поля Земли приводит, при распространении радиоволн в ионосфере, к появлению эффектов:**

А. Гиромангнитного резонанса, двойного лучепреломления и Фарадея;

В. Затухания и вращения плоскости поляризации;

С. Затухания и рефракции.

**Раздел 6**

**Тест 6**

**1. Радиорелейные линии связи работают в диапазоне:**

- A. Дециметровых и сантиметровых волн;
- B. Метровых волн;
- C. Коротких волн.

**2. Спутниковое телевидение использует диапазон:**

- A. Сантиметровых волн;
- B. Оптических волн;
- C. Дециметровых волн.

**3. Радиоволны средневолнового диапазона в ночное время суток (на теневой стороне Земли) распространяются как:**

- A. Поверхностные и пространственные волны;
- B. Поверхностные (земные) волны;
- C. Пространственные (ионосферные) волны.

**4. Эффекты реверберации наиболее часто проявляются:**

- A. В диапазоне коротких волн;
- B. На средних волнах;
- C. В диапазоне УКВ.

**5. Эффект антипода проявляется в диапазоне:**

- A. Длинных и сверхдлинных радиоволн;
- B. Средних радиоволн;
- C. Коротких радиоволн.

**6. Радиоэхо наблюдается в диапазоне:**

- A. Коротких радиоволн;
- B. УКВ;
- C. Средних радиоволн.

**7. При проектировании КВ линий связи выбор максимально применимой частоты (МПЧ) осуществляется для:**

- A. Обеспечения условия отражения радиоволн;
- B. Обеспечения условий отсутствия многолучевого отражения;
- C. Обеспечения допустимого уровня затухания амплитуды поля.

**8. Метод приведенных высот антенн позволяет учесть влияние на распространение радиоволн:**

- А. Кривизны земной поверхности;
- В. Неровностей земной поверхности;
- С. Рефракции (искривления траектории) радиоволн.

**9. Уравнение идеальной радиосвязи может быть использовано для расчета:**

- А. Космических линий связи;
- В. Линий связи КВ диапазона;
- С. Длинноволновых линий связи.

**10. Системы дальнего тропосферного распространения УКВ используют:**

- А. Эффекты рассеяния радиоволн на турбулентных неоднородностях тропосферы;
- В. Явление сверхрефракции;
- С. Отражения от ионосферы.

**Внимание! Правильный полный ответ в каждом тесте представлен под буквой «А».**

#### **4.4 Вопросы для подготовки к экзаменам**

##### **Часть 1 – электродинамика**

(Все ссылки на разделы учебного пособия относятся к [1])

1. Краткие сведения из истории развития учения об электромагнетизме и основные определения электродинамики (п.1.1).
2. Элементарный электрический излучатель (п.5.1).
3. Векторы электрического поля (п.1.2).
4. Излучение элементарного магнитного диполя (п.5.2).
5. Векторы магнитного поля (п.1.3).

6. Общие понятия и определения направляющих систем и направляемых волн (п.6.1).
7. Силовые линии поля (п.1.4).
8. Классификация линий передачи (п.6.1.1).
9. Классификация сред в электродинамике (п.1.5).
10. Виды линий передачи (п.6.1.2).
11. Уравнения Максвелла в интегральной форме (п.1.6).
12. Классификация электромагнитных волн, распространяющихся в линиях передачи (п.6.1.3).
13. Уравнения Максвелла в дифференциальной форме (п.1.7).
14. Методы изучения электромагнитных процессов в линиях передачи (п.6.2).
15. Полная система уравнений Максвелла (п.1.8).
16. Постановка и решение электродинамической задачи распространения направляемых электромагнитных волн в линиях передачи (п. 6.3.1).
17. Система уравнений Максвелла в комплексной форме (п.1.9).
18. Структура поля волны  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе (п.6.4.4).
19. Комплексная диэлектрическая проницаемость среды. Классификация сред по проводимости (п.1.10).
20. Уравнения связи для E- и H-волн (п.6.3.2).
21. Теорема Умова-Пойнтинга (п.1.11).
22. Решение волновых уравнений для продольных составляющих векторов напряженности электрического и магнитного полей E- и H-волн (п.6.3.3).
23. Волновые уравнения для векторов поля (п.2.1).
24. Особенности распространения направляемых электромагнитных волн (п.6.3.4).
25. Волновые уравнения для электродинамических потенциалов (п.2.2).

26. Система уравнений для E –волн в прямоугольном волноводе (п.6.4.1).
27. Волновое уравнение для вектора Герца (п.2.3).
28. Система уравнений для H –волн в прямоугольном волноводе (п.6.4.2).
29. Волновые уравнения в комплексной форме (п.2.4).
30. Анализ решений уравнений Максвелла для прямоугольного волновода (п.6.4.3).
31. Формулировка задач электродинамики (п.3.1).
32. Структура поля волны  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе (п.6.4.4).
33. Строгие методы решения задач электродинамики (п.3.2).
34. Распределение токов проводимости по стенкам волновода, в котором распространяется волна  $H_{10}$  (п.6.4.5).
35. Приближенные методы решения задач электродинамики (п.3.3).
36. Структуры полей H-волн высших типов в прямоугольном волноводе (п.6.4.6).
37. Решение уравнений электродинамики для плоской волны (п.4.1).
38. Структуры полей E-волн в прямоугольном волноводе (п.6.4.7).
39. Распространение плоских волн в различных средах (п.4.2).
40. Физический смысл индексов  $m$  и  $n$ , входящих в обозначение собственных волн прямоугольного волновода (п.6.4.8).
41. Поляризация плоских волн (п.4.3).
42. Системы уравнений для E- и H- волн в круглом волноводе (п.6.5.1).
43. Перенос энергии плоской волной (п.4.4).
44. Структура поля волны  $H_{11}$  в круглом волноводе (п.6.5.2).
45. Уравнения Максвелла в интегральной форме (п.1.6).
46. Структура поля волн  $H_{01}$  и  $E_{01}$  в круглом волноводе (п.6.5.3).
47. Уравнения Максвелла в дифференциальной форме (п.1.7).

48. Физический смысл индексов  $m$  и  $n$ , входящих в обозначение собственных волн круглого волновода (п.6.5.4).
49. Полная система уравнений Максвелла (п.1.8).
50. Рекомендации по графическому построению силовых линий векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в поперечном сечении круглого волновода (п.6.5.5).

## Часть 2 – распространение радиоволн

(Все ссылки на разделы учебного пособия относятся к [2])

1. Классификация радиоволн по диапазонам и способу распространения (п.1.1).
2. Особенности распространения радиоволн в свободном пространстве (п.1.2).
3. Потери передачи в свободном пространстве (п.1.3).
4. Множитель ослабления поля свободного пространства (п.1.4).
5. Область пространства, существенная для распространения радиоволн (п.1.5).
6. Флюктуационные процессы при распространении радиоволн на естественных трассах (п.1.6).
7. Дифракция радиоволн на земной поверхности (п.2.1).
8. Расчёт множителя ослабления в освещённой зоне (п.2.2).
9. Учёт влияния кривизны земной поверхности (п.2.3).
10. Расчёт множителя ослабления в области тени и полутени (п.2.4).
11. Влияние неоднородности электрических параметров Земли на распространение радиоволн (п.2.5).
12. Влияние рельефа местности на величину множителя ослабления (п.2.6).
13. Состав и строение атмосферы (п.3.1).
14. Электрические параметры тропосферы и стратосферы (3.2.1).
15. Электрические параметры ионосферы (3.2.2).
16. Рефракция радиоволн в тропосфере (3.3.1).

17. Дальнее тропосферное распространение (ДТР) (п.3.3.2).
18. Ослабление радиоволн в тропосфере (п.3.3.3).
19. Влияние ионосферы на распространение радиоволн (п.3.4).
20. Влияние атмосферы на замирания сигналов при распространении радиоволн вдоль Земли (п.3.5).
21. Сверхдлинные и длинные радиоволны (СДВ и ДВ) (п.3.6.1).
22. Средние волны (СВ) (п.3.6.2).
23. Короткие волны (КВ) (п.3.6.3).
24. Основы расчёта КВ линий связи (п.3.6.4).
25. Ультракороткие волны (УКВ) (п.3.6.5).

Леонид Яковлевич Родос  
Дмитрий Аркадьевич Чистяков

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН  
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Технический редактор Т.В. Шабанова  
Сводный темплан 2008 г.  
Лицензия ЛР № 020308 от 14.02.97

---

Подписано в печать			Формат 60x84 /16
Б. кн.-журн.	П.л. 9.75	Б.л. 4.875	Изд-во СЗТУ
	Тираж	Заказ	

---

Северо-Западный государственный заочный технический университет  
Изд-во СЗТУ, член Издательско-полиграфической ассоциации  
Университетов России

191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, 5