

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра управления в технических системах

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

_____ Е.И. Луковникова

« _____ » _____ 201__ г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВОЛНЫ**

Б1.Б.18

НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ

11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ

Многоканальные телекоммуникационные системы

Программа академического бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	3
2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	4
3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ	4
3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....	4
3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости	5
4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	6
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий	6
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам	8
4.3 Практические занятия.....	44
4.4 Контрольные мероприятия: контрольная работа	44
5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	46
6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ	47
7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....	47
8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ	47
9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....	48
9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ/ практических работ	48
10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ	56
11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ	56
Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....	57
Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины	64
Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе	66
Приложение 4. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости по дисциплине.....	66

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к экспериментально-исследовательскому виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

Цель дисциплины

Изучение студентами особенности структуры электромагнитного поля волн распространяющихся в различных средах, в линиях передачи электромагнитной энергии и объемных резонаторах; формирование у студентов навыков алгоритмизации краевых задач электродинамики. В результате изучения дисциплины у студентов должны сформироваться знания, навыки и умения, позволяющие проводить самостоятельный анализ физических процессов, происходящих в различных направляющих системах, устройствах сверхвысоких частот, в однородных и неоднородных средах, понимать сущность электромагнитной совместимости.

Задачи дисциплины

Получить знания, имеющие не только самостоятельное значение, но и обеспечивающие базовую подготовку для усвоения ряда последующих дисциплин. Данная дисциплина является первой, в которой студенты изучают вопросы практического применения теории электромагнитного поля. Она находится на стыке дисциплин, обеспечивающих базовую и специальную подготовку студентов. Изучая эту дисциплину, студенты впервые знакомятся со структурой электромагнитного поля, возникающего в различных средах и направляющих системах. Приобретенные студентами знания и навыки необходимы как для грамотной эксплуатации телекоммуникационной аппаратуры, так и для обработки широкого класса устройств, связанных с передачей и приемом сигналов.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
1	2	3
ОПК-3	Способность проводить инструментальные измерения, используемые в области инфокоммуникационных технологий и систем связи.	Знать: - особенности структуры электромагнитного поля волн, распространяющихся в различных средах, в линиях передачи электромагнитной энергии и объемных резонаторах; Уметь: - проводить анализ физических процессов, происходящих в различных направляющих системах, устройствах сверхвысоких частот, в однородных и неоднородных средах - понимать сущность электромагнитной совместимости;. Владеть: - навыками экспериментального определения статических характеристик и параметров различных электронных приборов и их компьютерного исследования по электрическим моделям;

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.Б.18 Электромагнитные поля и волны относится к базовой части.

Дисциплина электромагнитные поля и волны базируется на знаниях, полученных при изучении дисциплин Б1.Б.07 Физические основы электроники, Б1.Б.12 Теория электрических цепей, Б1.Б.13 Электроника.

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, электромагнитные поля и волны представляет основу для Б1.Б.19 Электропитание устройств и систем телекоммуникаций, Б1.В.15 Проектирование и эксплуатация систем передачи, Б1.В.ДВ.8.1 Электроснабжение телекоммуникационных предприятий

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

2015-2017 годы набора

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						Контрольная работа	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов (с экз.)	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Очная	2,3	4,5	180	70	35	-	35	83	кр	Экзамен, Зачет
Заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Заочная (ускоренное обучение)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Очно-заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

2018 годы набора

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						Контрольная работа	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов (с экз.)	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Очная	2,3	4,5	180	70	35	-	35	83	-	Экзамен, Зачет
Заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(ускоренное обучение)										
Очно-заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

<i>Вид учебных занятий</i>	<i>Трудо-емкость (час.)</i>	<i>в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>	<i>Распределение по семестрам, час</i>	
			<i>4</i>	<i>5</i>
1	2	3	4	5
I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)	70	20	36	34
Лекции (Лк)	35	8	18	17
Лабораторные работы (ЛР)	-	-	-	-
Практические работы (ПР)	35	8	18	17
Контрольная работа (кр)	+	4	+	-
Индивидуальные (групповые) консультации	+	-	+	+
II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)	83	-	81	2
Подготовка к лабораторным работам	-	-	-	-
Подготовка к практическим работам	30	-	15	15
Выполнение контрольной работы	20	-	20	-
Подготовка к зачету	15	-	15	-
Подготовка к экзамену в течение семестра	18	-	-	18
III. Промежуточная аттестация зачет, экзамен	+	-	+	
	27			27
Общая трудоемкость дисциплины час.	180	-	144	36
зач. ед.	5	-	4	1

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий - для очной формы обучения:

№ раз- дела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоем- кость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)		
			учебные занятия		самосто- ятельна я работа обучаю- щихся
			лекции	практические работы	
1	2	3	4	5	6
1.	Электромагнитное поле	18	6	4	8
1.1	Электромагнитные свойства среды. Уравнения Максвелла	2	1	-	1
1.2	Поток электрического смещения. Дивергенция и ротор векторного поля. Циркуляция магнитного поля.	2	1	-	1
1.3	Электромагнитная индукция. Закон Фарадея. Основные уравнения электромагнитного поля.	2,5	1	-	1,5
1.4	Граничные условия. Граничные условия для переменных полей у поверхности идеального проводника. Основные свойства монохроматического поля.	2,5	1	-	1,5
1.5	Граничные условия для переменных полей у поверхности идеального проводника. Комплексные проницаемости. Система уравнений монохроматического поля.	2,5	1	-	1,5
1.6	Плоские волны в неограниченных средах. Некоторые характеристики электромагнитной волн. Волны в диэлектрике. Волны в проводнике. Поляризация электромагнитной волны.	6,5	1	4	1,5
2.	Энергия электромагнитного поля. Теория единственности	14	3	3	8
2.1	Теорема Пойтинга	6,5	1,5	1	4
2.2	Теорема единственности	7,5	1,5	2	4
3.	Волны у границы раздела двух сред	14	4	2	8
3.1	Отражение и преломление волн на границе идеальных диэлектриков	7	2	1	4
3.2	Граничное условие Леонтовича	7	2	1	4
4.	Излучение и дифракция электромагнитного поля	20	4	8	8

4.1	Мощность излучения элементарного электрического вибратора	8	2	3	3
4.2	Инвариантность уравнений поля к элементам электрических и магнитных полей	7	1	3	3
4.3	Дифракция электромагнитных волн	5	1	2	2
5.	Волны и резонаторы	19	4	6	9
5.1	Классификация направляемых волн. Класс ТЕМ (поперечные электромагнитные волны). Классы волн E и H.	9	2	3	4
5.2	Волны в полом металлическом волноводе. Круглый волновод. Режимы волны.	10	2	3	5
6.	Возбуждение волноводов	10	2	-	8
6.1	Запредельные волноводы. Коаксиальные линии. Полосковые линии.	10	2	-	8
7.	Объемные резонаторы	15	2	4	9
7.1	Возбуждение резонаторов	15	2	4	9
8.	Замедляющие системы	10	2	-	8
8.1	Спиральный волновод. Возбуждение волноводов поверхностной волны.	10	2	-	8
9.	Элементы волноводного тракта	19	6	4	9
9.1	Элементы коаксиальной линии. Волноводный изгиб. Реактивные элементы. Короткозамыкающие поршни.	8	2	4	2
9.2	Неотражающие устройства. Оконечные нагрузки. Фильтры типов волн. Вращающееся сочленение.	4	2	-	2
9.3	Направленный ответвитель. Многоплечные узлы. Коаксиальный кольцевой мост (гибридное кольцо).	3	1	-	2
9.4	Антенный переключатель. Гиратор. Циркулятор.	4	1	-	3
10.	Волоконно-оптическое системы передачи	14	2	4	8
10.1	Длина регенерационного участка	14	2	4	8
	ИТОГО	153	35	35	83

4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

1.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СРЕДЫ. УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА.

Электромагнитные взаимодействия между зарядами и полями зависят от свойств среды.

Макроскопические параметры среды в каждой точке поля связывают попарно векторы электромагнитного поля:

$$\mathbf{D} = \epsilon_a \mathbf{E}; \quad \mathbf{B} = \mu_a \mathbf{H}; \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E},$$

где \mathbf{J} – плотность электрического тока, σ – удельная электрическая проводимость среды.

Параметры большинства сред скалярные и постоянные. Среды как правило изотропные и линейные. При возрастании напряженности поля линейная зависимость нарушается, а среда становится нелинейной.

В анизотропных средах соотношения между парами векторов зависят от их ориентации. В соответствии с этим различают нелинейные диэлектрики, анизотропные магнетики и т.п.

В приведенных выше формулах σ – удельная электрическая проводимость среды, а уравнение $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ представляет закон Ома в дифференциальной форме; ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды. Для вакуума она равна $\epsilon_0 = 8,85416 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ и называется электрической постоянной. Относительная диэлектрическая проницаемость, называемая также просто диэлектрической проницаемостью, безразмерная величина представляет собой отношение

$$\epsilon = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_0}.$$

Под воздействием электрического поля диэлектрики поляризуются: в них ориентируются элементарные электрические диполи.

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость. Абсолютную магнитную проницаемость вакуума называют магнитной постоянной

$$\mu_0 = 0,4\pi \text{ мкГн/м} = 1,256637 \text{ мкГн/м}.$$

Относительная магнитная проницаемость равна:

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0}$$

Уравнения Максвелла

Макроскопическая теория электромагнетизма основывается на уравнениях Максвелла. Система уравнений электромагнитного поля была постулирована Максвеллом, т.е. введена в теорию аксиоматически. Исходными из этих уравнений являются уравнения Максвелла в интегральной форме, как непосредственно основанные на опыте.

1.2. Поток электрического смещения. Дивергенция и ротор векторного поля. Циркуляция магнитного поля.

Обобщенная теорема Гаусса – интегральная форма уравнений Максвелла: поток электрического смещения через любую замкнутую поверхность равен электрическому заряду, заключенному внутри этой поверхности, т.е.

$$\oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = \int_V \rho dV.$$

Отсюда следует, что, если внутри указанной поверхности нет зарядов, то поток электрического смещения через эту поверхность равен нулю. Следствием теоремы Гаусса является закон Кулона:

$$\mathbf{F} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi \epsilon_a r^2} \mathbf{e}_r,$$

где \mathbf{e}_r – единичный орт, Q_1 и Q_2 – величины зарядов, r – расстояние между зарядами.

Связь между объемной плотностью электрического заряда и вектором электрического смещения устанавливается обобщенной теоремой Гаусса в дифференциальной форме.

Будем сжимать поверхность S вокруг избранной точки так, чтобы заключенный внутри ее объем стремился к нулю. Эта операция математически запишется следующим образом:

$$\lim_{V \rightarrow 0} \frac{\oint \bar{D} dS}{V} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\int \rho dV}{V} = \rho.$$

Левая часть уравнения есть дивергенция вектора (или расходимость), т.е. можно записать:

$$\operatorname{div} \bar{D} = \rho.$$

Дивергенция и ротор векторного поля

Дивергенцией или расхождением поля D называется скаляр, определенный в каждой точке поля и являющийся объемной производной этого поля:

$$\operatorname{div} \bar{D} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\oint \bar{D} dS}{V}.$$

Вычисляется по формуле:

$$\operatorname{div} \bar{D} = \frac{\partial \bar{D}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{D}_y}{\partial y} + \frac{\partial \bar{D}_z}{\partial z} \quad (\text{в декартовых координатах}).$$

Ротор (иначе ротация) поля D есть вектор, определенный в каждой точке поля и являющийся объемной производной этого поля, взятой с обратным знаком:

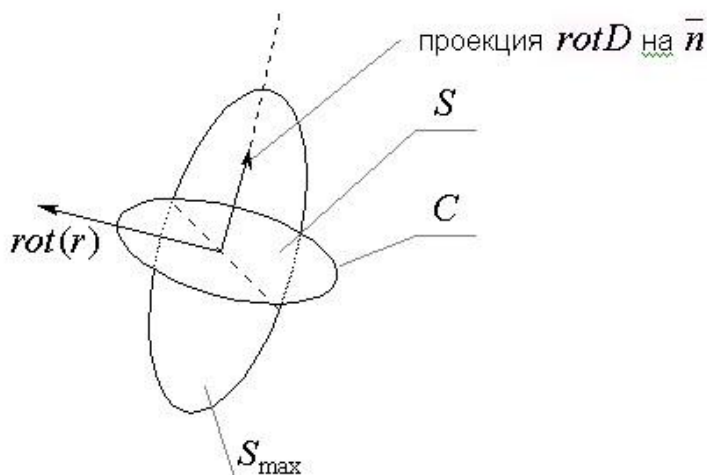
$$\operatorname{rot} \bar{D} = - \lim_{V \rightarrow 0} \left(\frac{1}{V} \oint \bar{D} dS \right).$$

По другому определению ротацией поля D называется вектор, образуемый следующим образом (см. рис. 1.2.1):

1) через точку r проводят небольшую площадку S;

2) вычисляют циркуляцию $\oint_C \bar{D} dr$ вдоль контура, ограничивающего эту площадку;

3) рассматривают отношение этой циркуляции к площади S, когда S стремится к нулю, стягиваясь к точке r, причем положение площади остается неизменным;



4) изменяя положение этой площадки, устанавливают направление, при котором полученный предел достигает максимума;

5) в точке r определяется вектор rotD, модуль которого равен полученному максимуму, а направление совпадает с направлением вектора площадки S_{max}, т.е.

$$|\operatorname{rot} \bar{D}| = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{\oint_C \bar{D} dr}{S_{\max}}.$$

Формула для вычисления в декартовых координатах имеет следующее выражение

$$\operatorname{rot} \bar{D} = \left(\frac{\partial \bar{D}_z}{\partial y} - \frac{\partial \bar{D}_y}{\partial z} \right) \times \bar{i} + \left(\frac{\partial \bar{D}_x}{\partial z} - \frac{\partial \bar{D}_z}{\partial x} \right) \times \bar{j} + \left(\frac{\partial \bar{D}_y}{\partial x} - \frac{\partial \bar{D}_x}{\partial y} \right) \times \bar{k}.$$

Таким образом, в каждой точке поля дивергенция вектора D равна объемной плотности электрического заряда.

Циркуляция магнитного поля

Циркуляция вектора напряженности магнитного поля \vec{H} по любому замкнутому контуру (магнитодвижущая сила) равна сумме истинного электрического тока и тока смещения, протекающего сквозь поверхность, ограничивающую этим контуром:

$$\oint_C \vec{H} dl = \frac{d\Phi_D}{dt} + I,$$

Где $I = \int J dS = \frac{dQ}{dt}$ - истинный электрический ток (ток проводимости), а также конвекционный ток;
 $\frac{d\Phi_D}{dt} = \frac{d}{dt} \int \vec{D} dS$ - скорость изменения потока электрического смещения (ток смещения).

Таким образом, можно записать: $\oint_C \vec{H} dl = \frac{d}{dt} \int \vec{D} dS + \int \vec{J} dS$. Это есть обобщенный закон Ампера (в интегральной форме).

Если циркуляция вектора \vec{H} по контуру указанной площадки не равна нулю, поле носит вихревой характер, т.е. $\text{rot} \vec{H}$ отличен от нуля. Считая \vec{J} и \vec{D} постоянными в пределах малой площади, можно записать:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}.$$

Так как площадка S может быть ориентированна в любом направлении, то $\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ (дифференциальная форма закона Ампера).

Итак, ротор вектора напряженности магнитного поля в любой его точке равен сумме плотности истинного электрического тока и скорости изменения вектора электрического смещения в этой точке.

Таким образом, магнитное поле создается при любом движении электрических зарядов (электрическом токе) и изменении во времени вектора электрического смещения.

1.3. Электромагнитная индукция. Закон Фарадея . Основные уравнения электромагнитного поля.

Интегральная форма.

Циркуляция вектора напряженности электрического поля \vec{E} по любому замкнутому контуру равна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур, с обратным знаком в правой системе координат:

$$\oint \vec{E} dl = - \frac{d\Phi}{dt} \text{ или } \oint \vec{E} dl = - \frac{d}{dt} \int \vec{B} dS,$$

где $\oint \vec{E} dl$ - электродвижущая сила, $\Phi = \int \vec{B} dS$ - магнитный поток или поток вектора магнитной индукции.

Дифференциальная форма.

Ротор вектора напряженности электрического поля в любой его точке равен по величине и противоположен по знаку скорости изменения вектора магнитной индукции в этой точке, т.е.

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt}.$$

Известно, что поток вектора магнитной индукции через любую замкнутую поверхность равен нулю. Линии вектора \vec{B} замкнуты либо уходят в бесконечность. Известно также, что магнитные заряды в природе отсутствуют.

Основные уравнения электромагнитного поля

Сведем вместе основные законы макроскопической электродинамики в неподвижных средах, которые вкратце были рассмотрены ранее. Уравнения Максвелла в интегральной форме:

$$\left. \begin{aligned} \oint_l \bar{H} dl &= \frac{d}{dt} \int_s D dS + \int_s J dS + \int_s J_{CT} dS \\ \oint_l \bar{E} dl &= - \frac{d}{dt} \int_s B dS \\ \oint_s \bar{D} dS &= \int_v \rho dV + \int_v \rho_{CT} dV \\ \oint_s \bar{B} dS &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Уравнения Максвелла в дифференциальной форме:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{H} &= \frac{\partial D}{\partial t} + J + J_{CT} \\ \operatorname{rot} \bar{E} &= - \frac{dB}{\partial t} \\ \operatorname{div} \bar{D} &= \rho + \rho_{CT} \\ \operatorname{div} \bar{B} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Первое уравнение системы представляет собой обобщенный закон Ампера, второе – обобщенный закон Фарадея, третье – обобщенную теорему Гаусса, четвертое отображает соленоидальность поля магнитной индукции.

Материальные уравнения для изотропных сред:

$$D = \epsilon_a E; B = \mu_a H; J = \sigma E$$

Уравнение силы Лоренца: $F = Q(E + \vartheta \times B)$.

Уравнения Максвелла в дифференциальной форме составляют основу всей электродинамики.

Известно, что переменные электрические и магнитные поля не существуют независимо друг от друга, они непрерывно переходят одно в другое и образуют электромагнитную волну.

Интегральные уравнения остаются справедливыми даже в том случае, если входящие в них поверхности и контуры пересекают границы, где физические свойства среды резко изменяются.

1.4 Граничные условия. Граничные условия для переменных полей у поверхности идеального проводника. Основные свойства монохроматического поля.

На границе между материалами (телами) параметры среды ϵ , μ , σ , скачкообразно изменяются. При этом неизбежно испытывают скачки некоторые векторы поля.

Для решения задач электродинамики, кроме уравнений Максвелла, необходимо знать граничные условия – соотношения между векторами, находящимися по обе стороны раздела сред.

Можно показать, что нормальная составляющая вектора электрической индукции D при переходе через граничную поверхность претерпевает скачок, численно равный поверхностной плотности электрического заряда:

$$(\bar{D}_1 - \bar{D}_2)n = \sigma.$$

Поверхностный заряд образуется на поверхности проводников лишь в электрическом поле. В переменном поле такие заряды могут возникнуть только на поверхности идеального проводника. Поэтому при переменных полях в реальных средах нормальная составляющая вектора магнитной индукции на границе не изменяется.

Такое же заключение можно сделать относительно нормальной составляющей вектора магнитной индукции: при переходе через границу он не изменяется.

Относительно касательных составляющих полей можно теоретически доказать, что касательная составляющая вектора напряженности магнитного поля непрерывна на границе любых реальных сред. То же относится и к электрической составляющей (касательной).

Граничные условия для переменных полей у поверхности идеального проводника

В электростатике при любой проводимости материала электрические поля в нем отсутствуют. Переменные же поля проникают в материал с конечной проводимостью. Однако если проводник считать идеальным, то заряды

внутри него столь подвижны, что мгновенно реагируют на сколь угодно быстрое изменение поля, создавая на его поверхности поверхностную плотность заряда:

$$\sigma_э = -\vec{E} \times \vec{n}$$

здесь $\sigma_э$ – поверхностная плотность заряда, которая обеспечивает нулевое электрическое поле внутри проводника.

Аналогично при изменении во времени магнитного поля поверхностные заряды перемещаются и создают поверхностный ток

$$\vec{J} = -\vec{n} \times \vec{H}_\tau$$

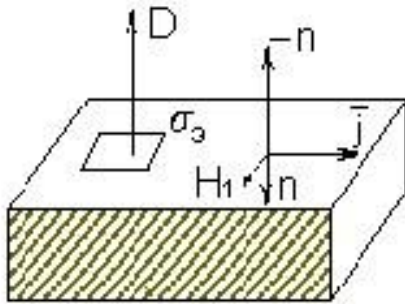


Рис. 1.4.1

где J – плотность поверхностного тока на поверхности идеального проводника, благодаря чему магнитное поле внутри проводника отсутствует.

Итак, в идеальной проводящей среде электромагнитное поле отсутствует:

$$E_2 = D_2 = H_2 = B_2 = 0 \quad (\text{рис. 1.4.1}). \quad \text{Таким образом, получаем}$$

для изотропной среды:

$$\left. \begin{aligned} D_{(-n)} &= \epsilon_1 E_1(-n) = \sigma_э; & E_{1\tau} &= 0 \\ H_{1n} &= 0; & H_{1\tau} \times n &= j \end{aligned} \right\}$$

Тангенциальная составляющая напряженности электрического поля и нормальная составляющая напряженности магнитного поля у поверхности идеального проводника отсутствуют.

Нормальная составляющая электрического поля определяется распределением поверхностного заряда.

Плотность электрического тока на поверхности равна величине и перпендикулярна по направлению касательной составляющей напряженности магнитного поля у поверхности.

Основные свойства монохроматического поля

Электродинамика рассматривает преимущественно переменные поля, изменяющиеся во времени по гармоническому закону с произвольной частотой. Известно, что любую функцию времени можно представить в виде ряда или в виде спектра частот. Поэтому достаточно рассмотреть поле колебаний одной частоты, называемое также монохроматическим. Для анализа таких полей применяется символический метод в комплексной форме.

Величины, с которыми приходится иметь дело, представляют собой векторы в трехмерном пространстве. Одновременно их представляют векторами, вращающимися с круговой частотой ω на комплексной плоскости.

Направление вектора в трехмерном пространстве – это реальная характеристика ориентации поля. Направление же вектора на комплексной плоскости это лишь условное обозначение определенной фазы данной гармонической величины.

1.5 Граничные условия для переменных полей у поверхности идеального проводника. Комплексные проницаемости. Система уравнений монохроматического поля.

Электрические потери.

Электрическое поле вызывает два вида потерь в среде. Это, во-первых, потери обусловленные проводимостью материала. Во-вторых, это поляризационные (диэлектрические) потери, которые объясняются трением при смещении заряженных частиц вещества в переменном поле. Это ведет к отставанию вектора D от вектора E . Следовательно, диэлектрическая проницаемость есть комплексная величина:

$$\epsilon_a = \epsilon_a' + i\epsilon_a'' = \epsilon_a (1 - itg\delta),$$

где $tg\delta = \frac{\epsilon_a''}{\epsilon_a'}$ – тангенс угла диэлектрических потерь. В широкой полосе частот $tg\delta$ постоянен (до ≈ 100 ГГц).

Магнитные потери.

В магнитных материалах при перемагничивании также возникают потери на трение, в результате которых вектор \mathbf{B} отстает по фазе от вектора \mathbf{H} . Эти потери учитывают, вводя тангенс угла магнитных потерь и комплексную магнитную проницаемость, т.е.

$$\mu_a = \mu'_a + i\mu''_a = \mu_a (1 - i \operatorname{tg} \delta^M).$$

Система уравнений монохроматического поля

Запишем уравнения Максвелла (в дифференциальной форме) для монохроматического поля с использованием символического метода:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \dot{\mathbf{H}} &= i\omega \dot{\mathbf{D}} + \dot{\mathbf{J}}_{\text{CT}} \\ \operatorname{rot} \dot{\mathbf{E}} &= -i\omega \dot{\mathbf{B}} \\ \operatorname{div} \dot{\mathbf{D}} &= \dot{\rho} + \dot{\rho}_{\text{CT}} \\ \operatorname{div} \dot{\mathbf{B}} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

Как известно, в операционном исчислении производная заменяется умножением на $i\omega$. Для однородной среды параметры можно вынести за знак дифференцирования, тогда

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \dot{\mathbf{H}} &= i\omega \epsilon_a \dot{\mathbf{E}} + \dot{\mathbf{J}}_{\text{CT}} \\ \operatorname{rot} \dot{\mathbf{E}} &= -i\omega \mu_a \dot{\mathbf{H}} \\ \epsilon_a \operatorname{div} \dot{\mathbf{E}} &= \dot{\rho}_{\text{CT}} \\ \operatorname{div} \dot{\mathbf{H}} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

В однородной среде \mathbf{J} и ρ отсутствуют.

Рассмотрим свойства поля в той части пространства, где отсутствуют источники. При этом векторы \mathbf{E} и \mathbf{H} связаны уравнениями Максвелла, то совершенно излишне решать волновые уравнения как для \mathbf{E} , так и для \mathbf{H} . Достаточно решить эти уравнения для одного из них. Исключая из этих уравнений одну из переменных приходим к волновому уравнению.

Решением волновых уравнений являются функции координат и времени, которые описывают электромагнитные волны, распространяющиеся в пространстве, волноводах и других устройствах.

1.6 Плоские волны в неограниченных средах. Некоторые характеристики электромагнитной волны. Волны в диэлектрике. Волны в проводнике. Поляризация электромагнитной волны.

Введем ряд определений. Фазовым фронтом называется поверхность, проходящая через точки с одинаковыми фазами (например, сферические, цилиндрические и т.п.). У плоской волны эквифазовая поверхность – плоскость.

Применительно к $\dot{\mathbf{E}}$ волновое уравнение получаем в виде обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка:

$$\frac{d^2 \dot{\mathbf{E}}}{dz^2} - \kappa^2 \dot{\mathbf{E}} = 0,$$

где общим решением является суперпозиция двух частных решений:

$$\dot{\mathbf{E}} = \dot{\mathbf{E}}_0^+ e^{-\kappa z} + \dot{\mathbf{E}}_0^- e^{\kappa z},$$

а величина κ есть коэффициент распространения – комплексная величина:

$$\kappa = \kappa_\alpha + i\kappa_\beta,$$

где κ_α – коэффициент затухания волны в среде, κ_β – фазовый коэффициент. Фазовый коэффициент показывает насколько изменяется фаза на пути распространения волны в единицу длины. Чтобы найти мгновенное значение вектора \mathbf{E} , необходимо выполнить операцию:

$$E = \sqrt{2} \cdot \operatorname{Re} \left[\underline{E}_g e^{i\psi} e^{i\omega t} \right] = \sqrt{2} \cdot E_g \cdot \cos(\omega t + \psi).$$

Приведенное общее решение можно по другому записать так (применительно к мгновенным значениям):

$$E = \sqrt{2} \cdot E_0^+ e^{-\kappa_\alpha z} \cdot \cos(\omega t - \kappa_\beta z + \psi^+) + \sqrt{2} \cdot E_0^- e^{+\kappa_\alpha z} \cdot \cos(\omega t + \kappa_\beta z + \psi^-).$$

Этот процесс можно представить как падающую волну (первое слагаемое) и отраженную (второе слагаемое). Здесь κ_α – коэффициент затухания (дБ/м)

Прямая волна затухает с ростом z , обратная также затухает (с учетом знака z).

Скорость движения фазового фронта называют фазовой. Действительно, из условия (по определению)

$$(\omega t - \kappa_\beta z + \psi^+) = \text{const},$$

продифференцировав получим: $\bar{v} = \frac{\omega}{\kappa_\beta} \bar{e}_z.$

Некоторые характеристики электромагнитной волны

Длиной волны λ называется расстояние между двумя фазовыми фронтами волны, различающимися по фазе на 2π , т.е. $z_2 - z_1 = \lambda$, то $\kappa_\beta (z_2 - z_1) = \kappa_\beta \lambda = 2\pi$.

Откуда $\lambda = \frac{2\pi}{\kappa_\beta} = \frac{2\pi}{\frac{\omega}{v}} = \frac{v}{f}$, где κ_β – мнимая часть фазового коэффициента, v – скорость света, f – частота колебаний.

Перпендикуляр к фронту волны называют лучом. Электромагнитная волна, у которой векторы \vec{E} и \vec{H} взаимно перпендикулярны и перпендикулярны направлению распространения, называются поперечной и ТЕМ-волной.

Отношение комплексных величин напряженностей электрического и магнитного полей в ТЕМ-волне называется волновым сопротивлением среды Z_B :

$$Z_B = |Z_B| e^{i\psi_B} = \frac{\underline{E}}{\underline{H}} = \frac{i \omega \dot{\mu}_a}{\dot{\kappa}} = \frac{i \omega \dot{\mu}_a}{i \omega \sqrt{\dot{\epsilon}_a \dot{\mu}_a}} = \sqrt{\frac{\dot{\mu}_a}{\dot{\epsilon}_a}}.$$

В общем случае Z_B – комплексная величина.

Волны в диэлектрике

Диэлектрик характеризуется комплексной диэлектрической проницаемостью:

$$\epsilon_a = \epsilon_a (1 - i \operatorname{tg} \delta).$$

Определим составляющие коэффициента распространения используя малость $\operatorname{tg} \delta$:

$$\dot{\kappa} = \kappa_\alpha + i \kappa_\beta = i \omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a (1 - i \operatorname{tg} \delta)}.$$

Так как для степенного ряда $a + bx + cx^2 \dots$ верно приближительное выражение $\frac{1}{1-x} \approx 1 + x$, то воспользовавшись разложением в степенной ряд получим:

$$\dot{\kappa} = i \omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a} \cdot \left(1 - i \frac{\operatorname{tg} \delta}{2} \right) = \frac{1}{2} k \operatorname{tg} \delta + i k,$$

где K – коэффициент распространения, $k = \omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a}$ – волновое число (фазовый коэффициент) в идеальном диэлектрике (т.е. без потерь). В реальном диэлектрике с малыми потерями он определяется по той же формуле. Таким образом, для реального диэлектрика с малыми потерями фазовый коэффициент k равен волновому числу k .

В вакууме он равен $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$

Фазовая скорость электромагнитной волны в вакууме (т.е. скорость света) определяется выражением:

$$c = \frac{\omega}{k_0} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 300000 \frac{\text{км}}{\text{с}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Фазовую скорость волны в любом диэлектрике можно определить по формуле:

$$v_{\phi} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}.$$

Длина волны в среде зависит от ее параметров:

$$\lambda_{\text{среды}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon \mu}}.$$

Частота колебаний в среде не меняется.

Волновое сопротивление вакуума z_{B0} , Ом, вычисляется по формуле

$$z_{B0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 376,73 \approx 120\pi.$$

Модуль волнового сопротивления диэлектрической среды:

$$|z_{B0}| = \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} = z_{B0} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}.$$

Волны в проводнике

Среда считается проводником, если $\sigma \gg \omega \epsilon_a$. Электромагнитная волна проникает в проводник на очень небольшую глубину, называемую скин-слоем:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_a \sigma}}.$$

Эта величина на высоких частотах не превышает долей миллиметра.

Закон изменения напряженности поля представляет экспоненту (рис. 1.6.1).

На глубине, равной длине волны, поле убывает в 535 раз, а мощность примерно в 300 тысяч раз. Поэтому металлы нельзя применять как среду для передачи элек- Рис. 4 трромагнитных волн.

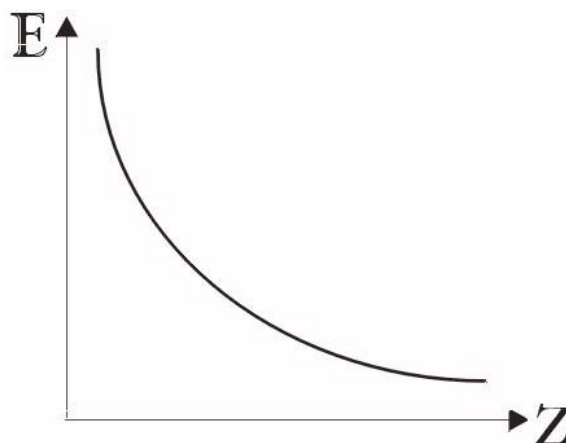


Рис.1.6.1

Поляризация электромагнитной волны

Волна типа ТЕМ является линейно поляризованной (или плоскополяризованной). Существует правая поляризация волны и левая. Вращению вектора E по часовой стрелке (т.е. в правой системе координат) соответствует правая поляризация.

Различают круговую и эллиптическую поляризацию. Поле с любым типом поляризации можно представить суммой двух волн, поляризованных линейно в двух ортогональных плоскостях.

2. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ.

2.1 ТЕОРЕМА ЕДИНСТВЕННОСТИ

Энергия представляет собой количественную меру движения материи. Закон сохранения энергии – один из фундаментальных законов природы, которому подчиняется явление электромагнетизма. Электромагнитное поле подчиняется закону сохранения массы:

$$W = mc^2.$$

Макроскопическая теория поля основана (кроме уравнений Максвелла) на следующих двух предположениях.

1. Электромагнитная энергия распределена в пространстве с объемной плотностью

$$\varpi = \frac{dW}{dV}$$

$$\varpi = \varpi_{\text{э}} + \varpi_{\text{м}} = \frac{1}{2} (\vec{E} \times \vec{D} + \vec{H} \times \vec{B}).$$

2. Плотность потока электромагнитной энергии $\vec{\Pi} = \frac{dW}{dt}$ равна вектор-

ному произведению напряженности электрического и магнитного полей:

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H},$$

где $\vec{\Pi}$ – вектор Пойтинга, указывающий направление движения энергии и равный по величине плотности ее потока, что равнозначно плотности мощности. Электромагнитная энергия, содержащаяся в объеме V , определяется объемным интегралом:

$$W = \int_V (\varpi_{\text{э}} + \varpi_{\text{м}}) dV.$$

Она может изменяться во времени вследствие:

- перехода внутри объема V электромагнитной формы движения в другие формы: тепловую, механическую, химическую. Это потери. Скорость отдачи энергии полем есть мощность потерь P_n ;
- приобретения полем внутри объема V энергии от сторонних источников. Скорость увеличения энергии поля равна мощности сторонних сил $P_{\text{ст}}$;
- излучения электромагнитных волн путем перехода их из одного объема V через ограничивающую поверхность S . Эта мощность определяется соотношением:

$$P_{\Sigma} = \oint_S \vec{\Pi} \times d\vec{S}.$$

Между названными составляющими существует баланс энергии (по закону сохранения энергии):

$$\frac{dW}{dt} = P_{\text{ст}} - P_n - P_{\Sigma}.$$

Закон сохранения энергии можно представить в интегральной форме:

$$\oint_S \vec{\Pi} \times d\vec{S} + \frac{d}{dt} \int_V \varpi dV + \int_V P_n dV = \int_V P_{\text{ст}} dV,$$

где ϖ – объемная плотность энергии, находящейся в объеме; P_n – объемная плотность мощности потерь; $P_{\text{ст}}$ – объемная плотность мощности сторонних сил.

Этот же закон в дифференциальной форме:

$$\text{div} \vec{\Pi} + \dot{\varpi} + P_n = P_{\text{ст}}.$$

Объемная плотность мощности потерь:

$$P_n = \rho \bar{\mathfrak{J}} \times \bar{\mathbf{E}} = \bar{\mathbf{J}} \times \bar{\mathbf{E}}, \text{ так как } \rho \cdot \bar{\mathfrak{J}} = \bar{\mathbf{J}}.$$

Поле отдает энергию, если угол между \mathbf{J} и \mathbf{E} меньше 90° . Ток проводимости $\mathbf{J} \parallel \mathbf{E}$, тогда

$$P_n = \sigma E^2 = \frac{1}{\sigma} J^2.$$

Это есть закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме. После интегрирования получим известную формулировку закона Ома:

$$P_n = G U^2 = R I^2.$$

Если сторонний ток по отношению к \mathbf{E} имеет угол больше 90° , то возникают «отрицательные» потери, т.е. электромагнитное поле приобретает энергию.

В соответствии со сказанным объемная плотность мощности сторонних сил:

$$P_{cm} = -\bar{\mathbf{J}}_{cm} \times \bar{\mathbf{E}}.$$

Теорема Пойтинга

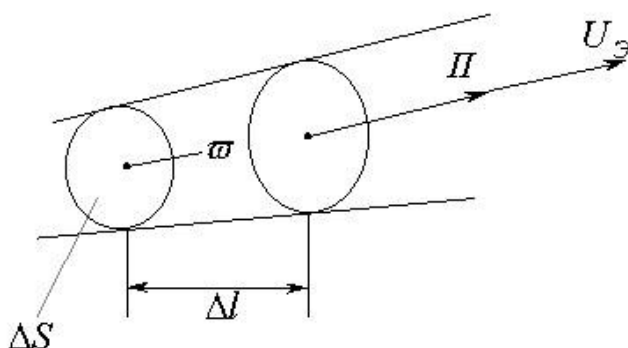
Теорема Пойтинга устанавливает соответствие баланса электромагнитной энергии системе уравнений Максвелла.

Произведем с уравнениями Максвелла в дифференциальной форме некоторые преобразования.

Умножим почленно второе уравнение скалярно на \mathbf{H} , а первое – на \mathbf{E} . Затем вычтем почленно из первого второе. После некоторых преобразований получим:

$$\operatorname{div}(\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{D}}}{2} + \frac{\bar{\mathbf{H}} \times \bar{\mathbf{B}}}{2} \right) + \bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{J}} = -\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{J}}_{ct}.$$

Это и есть уравнение Пойтинга в дифференциальной форме. Вычислим скорость электромагнитной волны как скорость переноса энергии и массы поля (рис. 2.1.1).



Дано: Π – плотность потока энергии; w – объемная плотность энергии волны.

Найти: $U_э$ – энергетическую скорость электромагнитной волны.

Решение: за время Δt энергия $W = \Pi \Delta S \Delta t$ заполняет объем $\Delta V = \Delta S \Delta l$, где $\Delta l = U_э \Delta t$. В то же время $W = w \Delta V = w \Delta S U_э \Delta t$. Прирав-

нивая оба выражения для W получим:

$$\Pi = w U_э,$$

откуда энергетическая скорость электромагнитной волны определится как

$$\bar{U}_э = \frac{\bar{\Pi}}{\bar{w}}.$$

Выполняя те же операции с уравнениями Максвелла в комплексной форме, получим выражение:

$$\operatorname{div} \bar{\Pi} + i \cdot 2\omega (\bar{w}_M^{cp} - \bar{w}_э^{cp}) + P_n^{cp} = P_{ct}^{cp} + i q_{ct}^{cp},$$

где q_{ct}^{cp} – мнимая часть сторонней мощности (символ «ср» означает усреднение за период).

Последнее уравнение есть уравнение Пойтинга в комплексной форме.

В процессе распространения волны электрическая энергия непрерывно переходит в магнитную и обратно. Поскольку существует равновесие электрического и магнитного полей в распространяющейся волне, то для скорости распространения волны можно получить следующее соотношение:

$$\bar{U}_z = \frac{\bar{\Pi}_{cp}}{\bar{\omega}_{cp}} = \frac{\bar{\Pi}_{cp}}{\bar{\omega}_3^{cp} + \bar{\omega}_M^{cp}} = \frac{|E_0| |Z_B|}{\epsilon_0 |E_0|^2} \cdot e_z = \frac{1}{\epsilon_a} \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_a}} \cdot e_z = \frac{e_z}{\sqrt{\epsilon_a \mu_a}}$$

Сравнивая полученное выражение с выражением для фазовой скорости волны, получаем важный вывод: в диэлектрике с малыми потерями энергетическая скорость волны совпадает по величине и направлению с ее фазовой скоростью.

2.2 Теорема единственности

Методы решения задач электродинамики, основанные на рассмотренных выше уравнениях, могут быть различными.

Однако решение, полученное каким-либо способом, единственно, т.е. электромагнитное поле определяется однозначно по заданному распределению источников.

Рассмотрим *внутреннюю* и *внешнюю* задачи.

Для области пространства, ограниченной поверхностью S верна следующая теорема. Монохроматическое электромагнитное поле в определенной ограниченной области V определится однозначно, если:

— в каждой точке области среда обладает электрическими либо магнитными потерями ($\epsilon_a \neq 0, \mu_a \neq 0$); величина этих потерь может быть весьма мала; заданы источники в этой области;

- заданы значения тангенциальной составляющей электрического или магнитного вектора на границе этой области.

Очевидно, что при отсутствии потерь в среде возможно существование свободных незатухающих колебаний, не связанных с источниками. В этом случае решение внутренней задачи становится неоднозначным.

Внешняя задача. Пусть рассматриваемое пространство неограниченно, т.е. внешней границы S не существует. Это эквивалентно сфере с бесконечно большим радиусом. В этом случае монохроматическое поле определяется в безграничной области однозначно, если:

— в каждой точке пространства среда обладает либо электрическими, либо магнитными потерями; заданы источники в этой области;

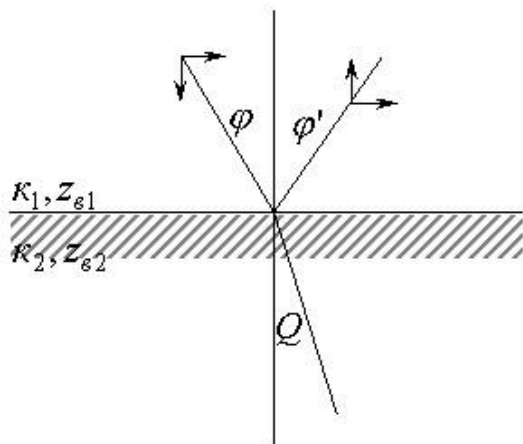
- заданы значения тангенциальной составляющей электрического или магнитного вектора на внутренней границе области; все источники находятся на конечном расстоянии от начала координат; поля убывают на бесконечности быстрее, чем $1/R$.

Первые три условия совпадают с соответствующими условиями для внутренней задачи.

Таким образом, найденные любым способом решение корректно поставленной задачи отвечает действительному распределению поля, и никакого другого решения быть не может.

3. ВОЛНЫ У ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД

На границе раздела разнородных сред происходит отражение, преломление и поглощение электромагнитных волн. Будем рассматривать плоские волны, падающие на бесконечных размеров плоскую поверхность, а электромагнитные волны в этом случае представлять в виде лучей. Тогда возникают две задачи:



— угловые – это законы для углов

отражения; динамические – законы напряженностей отраженной и преломленной волн, изменения фазы и поляризации.

По поводу угловых законов сошлемся на известные из физики положения:

— закон отражения: угол отражения равен углу падения;

— закон преломления: отношение синусов углов преломления и падения равно отношению комплексных коэффициентов распространения в первой и второй средах (рис. 6), т.е.

$$\frac{\sin \theta}{\sin \varphi} = \frac{\kappa_1}{\kappa_2} = \frac{\kappa_{1\alpha} + i \kappa_{1\beta}}{\kappa_{2\alpha} + i \kappa_{2\beta}}$$

Отсюда следует, что в общем случае эта величина носит комплексный характер, но если ограничиться диэлектриками с малыми потерями, то можно записать:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \varphi} = \frac{\kappa_{1\beta}}{\kappa_{2\beta}} = \frac{\vartheta_{\varphi 2}}{\vartheta_{\varphi 1}} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Рассмотрим динамические характеристики линейно поляризованной волны при падении на границу раздела двух сред. Проанализируем поведение коэффициента отражения $\Gamma = \frac{\dot{E}_{\text{пад}}}{\dot{E}_{\text{отр}}}$ и коэффициента прохождения $T = \frac{\dot{E}_{\text{пр}}}{\dot{E}_{\text{отр}}}$.

Если волна имеет перпендикулярную поляризацию (вектор \mathbf{E} перпендикулярен плоскости падения и параллелен границе раздела сред), то в соответствии с формулами Френеля получаем:

$$\Gamma_{\perp} = \frac{Z_{B2} \cdot \cos \varphi - Z_{B1} \cdot \cos \theta}{Z_{B2} \cdot \cos \varphi + Z_{B1} \cdot \cos \theta} \rightarrow \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\sin(\theta + \varphi)};$$

$$T_{\perp} = \frac{2Z_{B2} \cdot \cos \varphi}{Z_{B2} \cdot \cos \varphi + Z_{B1} \cdot \cos \theta} \rightarrow \frac{2 \sin \theta \cdot \cos \varphi}{\sin(\theta + \varphi)}.$$

Коэффициенты Γ и T_{\perp} могут быть отрицательными. Это означает поворот вектора E на 180 (рис. 7). Часть выражений справа от стрелки справедлива для немагнитных сред.

Для параллельной поляризации (когда вектор \vec{E} лежит в плоскости падения) формулы Френеля таковы:

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{z_{B2} \cdot \cos \theta - z_{B1} \cdot \cos \varphi}{z_{B2} \cdot \cos \theta + z_{B1} \cdot \cos \varphi} \rightarrow \frac{\operatorname{tg}(\theta - \varphi)}{\operatorname{tg}(\theta + \varphi)};$$

$$T_{\parallel} = \frac{2z_{B2} \cdot \cos \varphi}{z_{B2} \cdot \cos \theta + z_{B1} \cdot \cos \varphi} \rightarrow \frac{2 \sin \theta \cdot \cos \varphi}{\sin(\theta + \varphi) \cdot \cos(\theta - \varphi)}.$$

За положительное направление выбрано направление, совпадающее с положительным направлением z (рис. 8).

Из приведенных выражений для волны, падающей на границу раздела сред нормально, получим:

$$\Gamma_0 = \frac{z_{B2} - z_{B1}}{z_{B2} + z_{B1}}; \quad T_0 = \frac{2z_{B2}}{z_{B2} + z_{B1}}.$$

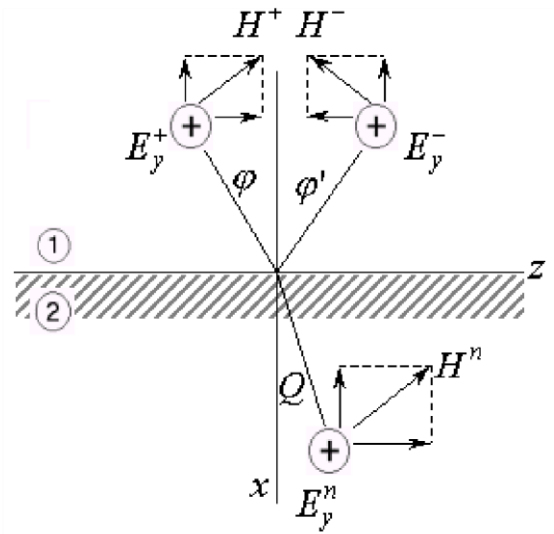
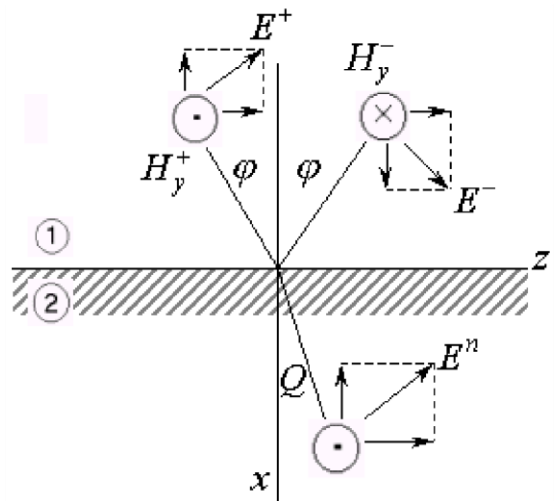


Рис. 7



3.1. Отражение и преломление волн на границе идеальных диэлектриков

Полное прохождение. Для волн с параллельной поляризацией существует угол падения, именуемый углом Брюстера $\varphi_{бр}$, при котором отраженная волна отсутствует, т.е. волна полностью переходит во вторую среду. В соответствии с законом преломления (Снеллиуса):

$$\sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} = \frac{\sin \varphi}{\sin \theta} = \frac{\sin \varphi}{\sin(90^\circ - \varphi)} = \operatorname{tg} \varphi_{бр}; \quad \varphi_{бр} = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}$$

Этот угол называют также углом полной поляризации. Для перпендикулярной поляризации не существует такого угла.

Вышеназванное свойство имеет большое практическое применение. Примеры.

1. Если волна с произвольной поляризацией на диэлектрическую пластину под углом Брюстера $\varphi_{бр}$, то отраженная волна имеет только перпендикулярную поляризацию, т.к. параллельно поляризованная компонента беспрепятственно проходит через пластину.

2. Диэлектрические пластины и шайбы, служащие для герметизации в различных устройствах, ставят под углом Брюстера. Тогда они полностью прозрачны для проходящих волн.

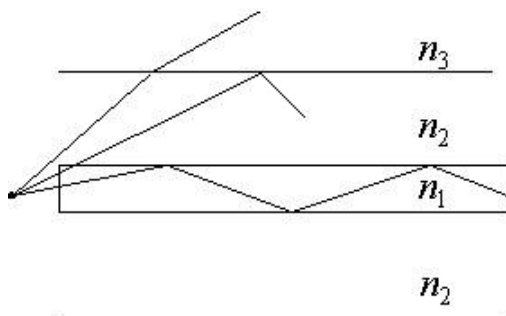
Полное отражение. Рассмотрим случай, когда волна проходит из среды оптически более плотной в менее плотную ($n_1 > n_2$) при малых потерях в обеих средах.

Из приведенного ранее закона Снеллиуса

$$\frac{\sin \theta}{\sin \varphi} = \frac{n_1}{n_2}$$

получим: $\sin \theta = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \varphi \leq 1$.

Критическим углом называется угол:



$$\varphi_{кр} = \operatorname{arcsin} \frac{n_2}{n_1} = \operatorname{arcsin} \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}$$

При превышении этого угла волна будет полностью отражаться от поверхности раздела сред.

Самым характерным примером использования явления полного отражения является оптический кабель (волновод), показанный на рис. 9.

3.2. Граничное условие Леонтовича

Отношение тангенциальных составляющих E и H на граничной поверхности S называется поверхностным импедансом:

$$Z_s = \frac{\dot{E}_t}{\dot{H}_t}$$

Поскольку тангенциальные составляющие поля по обе стороны границы сред одинаковы, то $Z_s = Z_{B2}$. То есть поверхностный импеданс на границе раздела двух сред, первая из которых оптически менее плотная, равен волновому сопротивлению второй (более оптически плотной) среды.

На границе с металлом $Z_s = R_s + iX_s = \frac{1}{\sigma\Delta} + i\frac{1}{\sigma\Delta}$, т.е.

$R_s = X_s = \frac{1}{\sigma\Delta}$, где Δ – толщина скин-слоя.

Практический выход из вышесказанного может быть реализован при создании неотражающих линз (от оптического диапазона до дециметрового) толщиной, равной четверти длины волны (или равной нечетному числу четвертей длин волн). При этом соотношение между волновыми сопротивлениями равно $\sqrt{\frac{Z_2}{Z_1 Z_3}}$.
Еще пример – тонкий и толстый экран.

Тонкий экран – это экран с толщиной меньше толщины скин-слоя ($d < \Delta$): так, для f 1 ГГц, d 1 мкм. Экранирующее действие осуществляется за счет отражения на границе раздела двух сред. Толстый экран ($d \gg \Delta$) поглощает энергию волны (отражением здесь можно пренебречь).

4. ИЗЛУЧЕНИЕ И ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

На практике приходится решать две противоположные задачи: проектировать излучающие устройства, которые должны излучать по возможности всю подводимую к ним энергию, и создавать направляющие устройства, которые должны только передавать электромагнитные волны, не излучая их за пределы этого устройства. Очевидно, что обе задачи сводятся к определению во всем пространстве электромагнитного поля, созданного некоторым распределением сторонних токов.

В качестве исходной примем систему уравнений Максвелла для однородной изотропной среды в комплексной форме.

Для решения поставленных задач вводится понятие векторного потенциала магнитного поля \vec{A} (с размерностью Тл·м):

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H} = \text{rot} \vec{A}$$

(равноценное название – электродинамический потенциал).

Вводится также понятие скалярного электродинамического потенциала:

$$\vec{E} + i\omega \vec{A} = -\text{grad} \phi \quad \text{или} \quad \vec{E} = -\text{grad} \phi - i\omega \vec{A}.$$

Здесь скаляр – и есть вновь введенное понятие.

В результате решения названных уравнений Максвелла получаем неоднородное волновое уравнение для векторного электродинамического потенциала:

$$\nabla^2 \vec{A} - \kappa^2 \vec{A} = -j \text{ст}$$

и для скалярного электродинамического потенциала соответственно:

$$\nabla^2 \phi - \kappa^2 \phi = \frac{-\rho_{cm}}{\epsilon_a}.$$

Здесь ∇^2 – Лапласиан (оператор Лапласа):

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}.$$

Используя введенное понятие электродинамического потенциала, с помощью первого уравнения Максвелла в комплексной форме находим напряженность электрического поля:

$$E = \frac{1}{i \omega \epsilon_a} \operatorname{rot} H = \frac{1}{i \omega \epsilon_a \Delta_a}$$

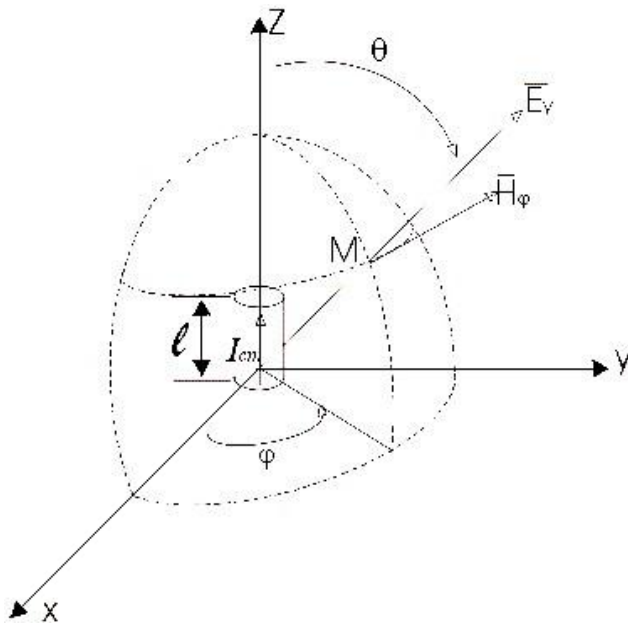


Рис. 10

В качестве стороннего источника обычно рассматривают элементарный электрический диполь, который представляет собой отрезок линейного проводника с неизменным по длине переменным током I_{cm} .

Диполь имеет длину l и поперечные размеры значительно меньше длины волны (вибратор Герца). Определим электромагнитное поле, создаваемое таким элементарным излучателем

Используя вышеприведенную формулу, определим напряженность электрической составляющей. При этом будем считать, что присутствуют в полярных координатах только две составляющие поля \bar{E}_r и \bar{H}_ϕ (рис. 10).

Получим следующее выражение:

$$\bar{E}_r(r, \theta) = \frac{\kappa^2 z_B \bar{I}_{cm} l}{4\pi} \left\{ 2 \left[\frac{1}{(\kappa r)^2} + \frac{1}{(\kappa r)^3} \right] \cdot \cos \theta \cdot \bar{l}_r + \left[\frac{1}{\kappa r} + \frac{1}{(\kappa r)^2} + \frac{1}{(\kappa r)^3} \right] \cdot \sin \theta \cdot \bar{l}_\theta \right\} e^{-\kappa r},$$

где z_B – волновое сопротивление среды.

Видим, что относительный вес отдельных слагаемых меняется в функции от (κr) , что приводит к качественным различиям поля.

Различают в связи с этим три зоны в поле получателя: ближнюю ($|\kappa r| < 0,1$), промежуточную ($0,1 < |\kappa r| < 10$) и дальнюю ($|\kappa r| > 10$).

Будем считать среду слабопоглощающей, т.е. $\kappa_\alpha < \kappa_\beta$.

Поле в ближней зоне. Здесь основную роль играют высшие степени (κr) , тогда

$$\bar{E}(r, \theta) = -i \frac{I_{cm} l}{4\pi r^2} \frac{z_B}{\kappa r} (2 \cos \theta \cdot \bar{e}_r + \sin \theta \cdot \bar{e}_\theta) e^{-\kappa r}.$$

Поле в промежуточной зоне имеет сложную структуру, где все составляющие играют определенную роль.

Поле в дальней зоне представляет наибольший интерес; здесь

$$\bar{E}(r, \theta) = \frac{i \kappa I_{cm} l}{4\pi r} z_B \cdot \sin \theta \cdot \bar{e}_\theta e^{-\kappa r},$$

где k – волновое число, κ – коэффициент распространения, $e\theta$ – единичный орт. Напомним, что k г k г $i\kappa$.

Общие для всех зон закономерности: осевая симметрия;

- ортогональность электрического и магнитного векторов; пропорциональность всех составляющих
- моменту тока $I_{cm} \ell$.
- Кроме общих свойств, электромагнитное поле в дальней зоне обладает следующими особенностями.

1. В каждой точке поля связь между векторами \mathbf{E} и \mathbf{H} сферической волны такая же, как у плоской однородной волны. Дальнюю зону называют еще зоной излучения.

2. Напряженности поля \mathbf{E} и \mathbf{H} сферической волны убывают с увеличением расстояния по закону \dots . Следовательно, средняя плотность потока энергии убывает обратно пропорционально r^2 .

3. Излучаемая энергия расщепляется в пространстве неравномерно, напряженность поля зависит от угла θ между осью излучателя и заданным направлением. Зависимость напряженности поля излучателя в дальней зоне от угловых сферических координат и при постоянном расстоянии от излучателя называется диаграммой направленности:

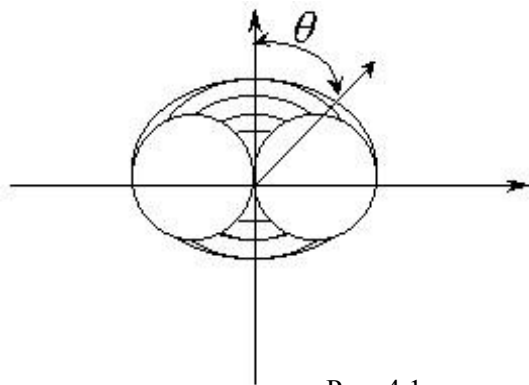


Рис. 4.1

$$F(\theta, \varphi) = \frac{E(\theta, \varphi)}{E_{\max}} = \frac{H(\theta, \varphi)}{H_{\max}}$$

Из формулы для \mathbf{E} в дальней зоне следует, что диаграмма направленности элементарного электрического излучателя $F(\theta, \varphi) \propto \sin^2 \theta$,

т.е. не зависит от угла φ (рис. 4.1). На большем расстоянии от источника сферическую волну можно считать плоской.

4.1. Мощность излучения элементарного электрического вибратора

Известно, что мощность излучения можно определить по формуле:

$$\Sigma = \oint_S \bar{\Pi} \times d\bar{S} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \left(\frac{\Pi_0}{r^2} \right) \cdot \sin^2 \theta \cdot r^2 \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi.$$

Подынтегральное выражение не зависит от азимутального угла φ и интегрирование по нему дает 2π . Интегрирование по θ приводит к результату:

$$\int_0^\pi \sin^3 \theta \cdot d\theta = \frac{4}{3}.$$

Поэтому: $P_\Sigma = \Pi_0 \cdot 2\pi \cdot \frac{4}{3} = \frac{2}{3} \pi z_B \left(\frac{\ell}{\lambda} \right)^2 I_{cm}^2.$

Сравним с выражением: $P = R I^2.$

Следовательно, часть выражения перед I_{cm}^2 есть некое сопротивление, оно называется сопротивлением излучения R_Σ , Ом:

$$R_\Sigma = \frac{2}{3} \pi z_B \left(\frac{\ell}{\lambda} \right)^2.$$

Видим, что чем больше R_Σ , тем больше излучаемая мощность.

4.2. Инвариантность уравнений поля к элементам электрических и магнитных полей

В теории электромагнитных полей (электродинамике) доказывается, что, не изменяя уравнений Максвелла, можно заменить все электрические величины магнитными, а магнитные электрическими при соблюдении определенных правил знаков.

Правила замен можно свести вместе в следующую таблицу:

$$\left. \begin{array}{l} \vec{E} \rightarrow \vec{H}; \quad \vec{J} \rightarrow \vec{J}^M; \quad \dot{\rho} \rightarrow \dot{\rho}^M; \quad \epsilon_a \leftrightarrow \mu_a; \\ \vec{H} \rightarrow -\vec{E}; \quad \vec{J}^M \rightarrow -\vec{J}; \quad \dot{\rho}^M \rightarrow -\dot{\rho}; \quad Z_B \rightarrow 1/Z_B. \end{array} \right\}$$

В этом случае вводится понятие магнитного излучателя и вместо электрического тока действует магнитный ток. Подобны также диаграммы направленности. В поле магнитного вибратора E и H меняются местами.

Мощность излучения элементарного магнитного вибратора вычисляется по формуле:

$$P(I_{\text{стм}})^2 \cdot \Sigma = \frac{2}{3} \pi \frac{1}{z_B} \left(\frac{\ell}{\lambda} \right)^2$$

Проводимость излучения из этой формулы:

$$G = \Sigma = \frac{2}{3} \pi \frac{z_1}{z_{B0}} \left(\frac{\ell}{\lambda} \right)^2 = \frac{1}{180} \left(\frac{\ell}{\lambda} \right)^2$$

Примерами магнитного излучателя могут служить катушка с током (с сердечником или без него) или щель в плоской проводящей поверхности.

Чаще всего размеры (длина) щели равны $\lambda/2$

4.3. Дифракция электромагнитных волн

Дифракцией называют явление огибания волнами препятствий. В результате дифракции электромагнитных волн поле наблюдается в области геометрической тени, куда при прямолинейном распространении волн оно не могло бы проникнуть. В современной науке задачей дифракции считают определение полного поля, созданного при взаимодействии исходной (падающей) волны с препятствием.

Эта задача может быть решена методами геометрической или физической оптики.

В основе метода геометрической оптики лежит представление о волне как совокупности лучей, не взаимодействующих между собой. Законы оптики применяются к каждому лучу. Решение в этом случае приближенное.

Метод физической оптики основан на использовании принципа Гюйгенса – Френеля, который гласит, что каждая точка на поверхности, возбуждаемой распространяющейся волной, может рассматриваться как источник вторичной сферической волны. Поле вне этой поверхности является результатом интерференции вторичных волн (рис. 4.3.1).

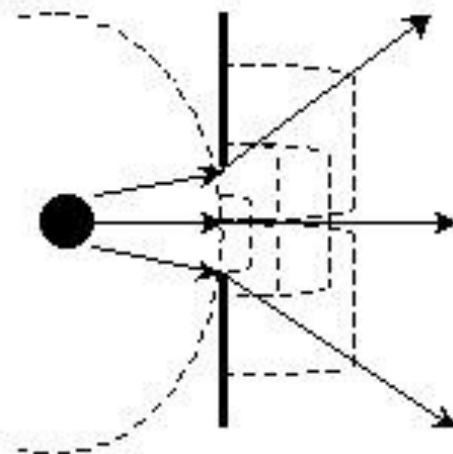
При расчетах полей методом физической оптики вводится понятие элемента Гюйгенса – прямоугольник со сторонами $a \ll \lambda$ и $b \ll \lambda$, параллельными векторами E_{cm} и H_{cm} .

Эти характеристики поля создаются падающей волной на поверхности S, они связаны между собой теми же соотношениями, что и в плоской волне.

Диаграмма направленности элемента Гюйгенса выражается функцией:

$$F(\theta, \varphi) = \frac{E(\theta, \varphi)}{E_{\text{max}}} = \frac{1}{2} (1 + \cos \theta).$$

Рис.4.3.1



Отсюда следует, что излучение его однонаправлено (от электрического и магнитного излучателей) и во всех сечениях, включающих ось z, представляет кардиоиду (в пространстве – яблоко).

В теории и практике распространения электромагнитных колебаний важную роль играет теорема взаимности, которая гласит, что, если среда линейна и изотропна, передача электромагнитных волн между двумя произвольными точками взаимна, т.е. одинакова при противоположных направлениях распространения волн, когда передатчик и приемник меняются местами.

5. ВОЛНОВОДЫ И РЕЗОНАТОРЫ

Основные сведения.

Электромагнитная волна в устройствах и системах связи должна распространяться по определенному пути и достигать пункта назначения с наименьшими потерями. Эту функцию выполняют направляющие системы; их называют также линиями передачи или волноводами.

Направляющие системы должны удовлетворять следующим требованиям:

- малое затухание;
- обеспечение заданной передаваемой мощности, что связано с недопустимостью электрического пробоя;
- экономическая целесообразность (малый вес, доступные материалы, простота конструкции и технологии производства).

Применяются следующие конструкции направляющих систем:

- двухпроводные линии (килоггерцы);
- коаксиальный кабель (мегагерцы);
- линии поверхностной волны (мегагерцы – гигагерцы); металлические волноводы (оптические волокна), (терагерцы).

5.1. Классификация направляемых волн. Класс ТЕМ (поперечные электромагнитные волны).

Классы волн Е и Н.

Чтобы существовала продольная составляющая вектора Пойтинга, поле любой волны обязательно должно иметь поперечные составляющие

Е и Н, лежащие в плоскости, перпендикулярной оси z.

Класс волны определяется наличием или отсутствием продольных составляющих E_z и H_z , параллельных направлению ее распространения.

При классификации используются два принципа: либо указывается, какой вектор лежит целиком в поперечной плоскости (ТЕМ, ТМ), либо указывается, какой вектор имеет продольную составляющую (т.е. Е и Н). Тип волны определяется числом максимумов и минимумов поля в поперечном сечении волновода и обозначается

двумя числовыми индексами (E_{01} и H_{11}).

Класс ТЕМ (поперечные электромагнитные волны)

Поле поперечной волны имеет только поперечные электрическую и магнитную составляющие. Коэффициент распространения волны ТЕМ в волноводе всегда равен таковому в среде, которой заполнена эта направляющая система.

Структура электрической составляющей поля волны ТЕМ в поперечной плоскости идентична электростатическому полю в этой системе. Отсюда следует:

- 1) структура поля волны ТЕМ в поперечном сечении не зависит от частоты;
- 2) волна ТЕМ может распространяться лишь в таких направляющих системах, где возможно существование электростатического поля.

Классы волн Е и Н

Эти волны имеют одну продольную составляющую E_z или H_z .

Е-волны, или «электрические», имеют электрическую продольную составляющую и, естественно, поперечные компоненты Е и Н. Другое их название ТМ-волны.

Н-волны, или «магнитные» имеют продольную магнитную составляющую H_z и поперечные Е и Н.

Существуют при некоторых условиях так называемые гибридные волны ЕН. Они возникают в волноводах из нескольких сред.

5.2 Волны в полой металлическом волноводе. Круглый волновод. Режимы волны.

Длина волны в волноводе определяется по формуле:

$$\lambda_B = \frac{2\pi}{k\beta} = \frac{\lambda}{\sin\varphi},$$

где φ – угол падения волны на стенку волновода (рис. 5.2.1).

В волноводе (прямоугольном) не существует волны ТЕМ (рис. 5.2.2).

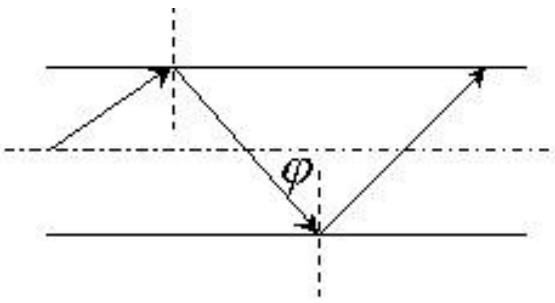


Рис. 5.2.1

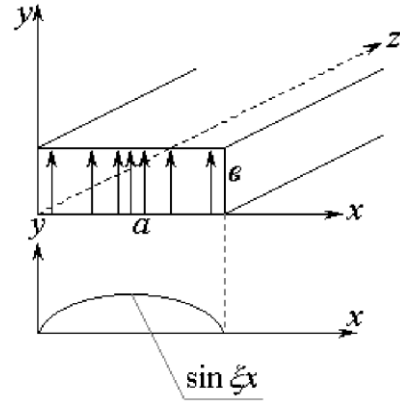


Рис 5.2.2

Размер волновода ограничивает размер длин волн, которые способны в нем распространяться:

$$\lambda < \frac{2a}{m},$$

где m – определяется числом максимумов на оси x .

Существует *критическая длина волны*, больше которой волны не могут распространяться в данном волноводе:

$$\lambda_{кр} = \frac{2a}{m}.$$

Соответственно определяется *критическая частота*:

$$f_{кр} = \frac{c}{\lambda_{кр}}.$$

Условие распространения $f > f_{кр}$.

Фазовая скорость (в воздухе) v_{ϕ} может быть и больше скорости света, так как она не характеризует скорости движения материи.

$$f_{кр}^{mn} = \frac{c}{2 \sqrt{\epsilon \mu}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2},$$

Существует понятие *энергетической скорости волны*. Она в волноводе меньше, чем скорость однородной волны в λ заполняющей его среде.

для :

$$\lambda_{кр}^{mn} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}.$$

Дисперсия – это зависимость фазовой скорости волны от частоты (или зависимость затухания от частоты). Дисперсия называется *нормальной*, если затухание

растет с ростом частоты. В противном случае дисперсия *аномальная*.

Сигналы, несущие информацию, передаются только модулированными колебаниями, т.е. они представляют собой спектр частот. В связи с этим скорость передачи огибающей (например при АМ) называют групповой. Групповая скорость почти всегда равна энергетической скорости света.

Отметим общие свойства волновых процессов в металлическом волноводе. Считаем волновод идеализированной системой без поглощения. Тогда для критических частот получаем соотношение:

Е Н

Любое поле типа $_{mn}$ или $_{mn}$ не может распространяться, если частота меньше критической (длина волны соответственно больше критической). С повышением частоты сначала появится возможность распространения только для одного типа

$$f > \min f_{кр}^{mn}$$

эта волна имеет название *основной*.

> **Н**

При **аВ** основной является волна $_{10}$, причем

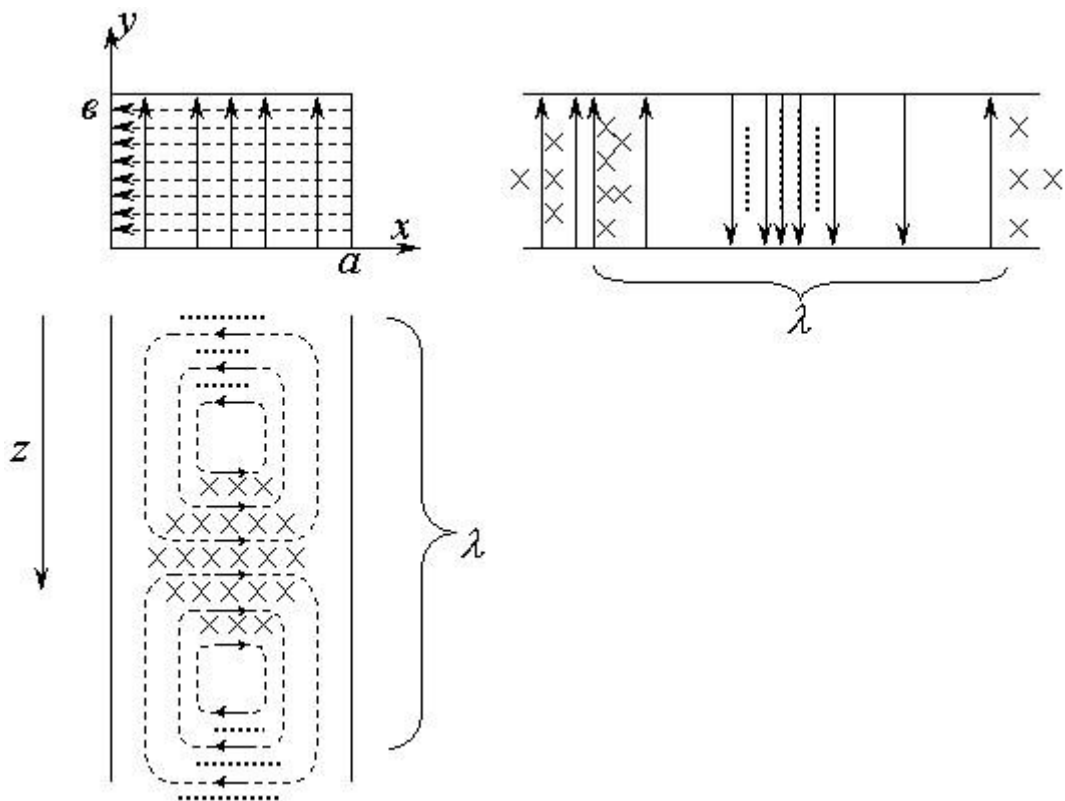


Рис. 5.2.3

Круглый волновод

Довольно часто наряду с прямоугольными волноводами применяют круглые волноводы. Здесь основной волной является волна H_{11} , где есть одна вариация по радиусу и одна вариация по углу φ (координаты полярные).

Картина поля волны H_{11} изображена на рис. 5.2.4.

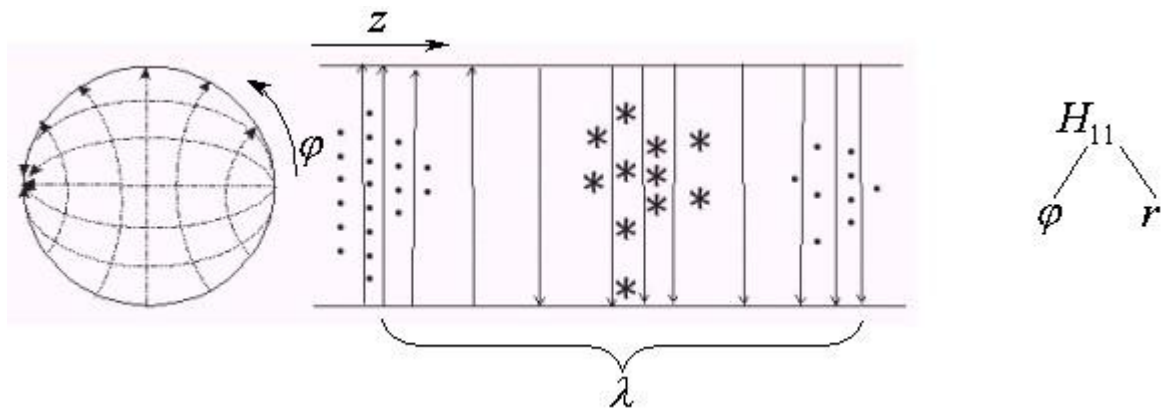


Рис. 5.2.4

Для сравнения приведем картину поля волны E_{01} (рис. 5.2.5).

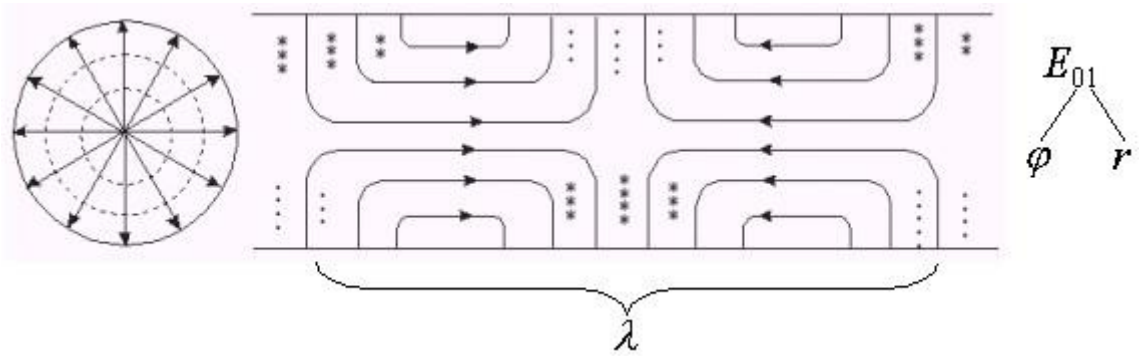


Рис. 5.2.5

Режимы волны

По направляющей системе могут распространяться волны либо одного, либо нескольких типов волн. В первом случае эту систему называют одномодовой, во втором – многомодовой. В частности, одномодовый режим характерен для двухпроводной линии с ТЕМ-волной в широком диапазоне частот.

Если на конце одномодовой направляющей системы включена нагрузка, то, кроме падающей волны с амплитудой U_+ , может возникнуть отраженная волна U^- . Коэффициент отражения нагрузки

$$\Gamma_n = \frac{U^-}{U^+}$$

При движении вдоль линии амплитуда и фаза волны меняются по закону

$$U^+(z) = U^+(0)e^{-\gamma z},$$

а отраженной по закону:

$$U^-(z) = U^-(0)e^{+\gamma z}.$$

Коэффициент отражения в произвольном сечении двух встречно бегущих волн равен

$$\Gamma(z) = \frac{U^-(z)}{U^+(z)} = \Gamma(0)e^{2\gamma z}.$$

В линии без потерь модуль $\Gamma(z)$ одинаков в любом сечении. Суперпозиция двух встречных волн создает в линии стоячую волну.

Параметры нагрузки и режим волны в линии можно охарактеризовать комплексным коэффициентом отражения или комплексным нормированным сопротивлением. Нормированная волна – это волна, несущая мощность в 1 Вт.

Режим работы линии можно характеризовать коэффициентом стоячей волны $K_{св}$ или коэффициентом бегущей волны $K_{бв}$:

$$K_{св} = \frac{|U^+| + |U^-|}{|U^+| - |U^-|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = \frac{|U|_{\max}}{|U|_{\min}};$$

$$K_{бв} = \frac{|U|_{\min}}{|U|_{\max}} = \frac{|U^+| - |U^-|}{|U^+| + |U^-|} = \frac{1 - |\Gamma|}{1 + |\Gamma|}.$$

Существует также такая связь между этими коэффициентами, где модуль коэффициента отражения равен

$$|\Gamma| = \frac{K_{св} - 1}{K_{св} + 1} = \frac{1 - K_{бв}}{1 + K_{бв}}.$$

В общем случае в линии устанавливается режим смешанной волны.

Очисто стоячая волна возникает в случае равенства по модулю амплитуд отраженной и падающей волн ($\Gamma_{н1}$).

Тогда $\begin{matrix} K \\ \rho_{\text{от}} \end{matrix} 0, \begin{matrix} K \\ \rho_{\text{пр}} \end{matrix} 1;$

$$U_{\text{min}} = 0, U_{\text{max}} = 2|U^+|.$$

Режим бегущей волны устанавливается при полном отсутствии отраженной волны.

6. ВОЗБУЖДЕНИЕ ВОЛНОВОДОВ

Возбуждением волноводов называется создание в нем высокочастотного электромагнитного поля. Устройство, служащее для этой цели, называют элементом связи или возбудителем. В основном используют следующие способы возбуждения волноводов:

- с помощью штыря; петли связи; щели в стенке волновода; отверстия (чаще всего круглого).
- При возбуждении решается задача возбудить определенный тип волн, не допуская нежелательного типа.
- Доказано, что амплитуда возбужденной волны максимальна, если:
 - сторонний электрический ток протекает вдоль электромагнитного поля возбужденной волны, т.е. ось штыря располагается параллельно E ;
 - сторонний магнитный ток – вдоль магнитного поля (ось петли или осевая линия щели параллельны вектору H);
 - возбудитель располагается в максимуме соответствующего компонента поля.

Отметим, что элемент связи, обеспечивающий эффективную передачу мощности в волновод, согласно теореме взаимности, будет столь же эффективно принимать мощность от волны того же типа и передавать ее в смежную линию.

6.1. Запредельные волноводы. Коаксиальные линии. Полосковые линии.

В запредельных волноводах волновые процессы невозможны. Имеется только затухающее, чисто реактивное поле, экспоненциально убывающее при удалении от возбудителя. При $f < f_{\text{кр}}$ волноводы используются в качестве аттенуаторов, т.е. устройств, ослабляющих на определенную величину мощность волны в линии передачи.

Коаксиальные линии

В коаксиальных кабелях распространяется волна типа ТЕМ. Частотный диапазон (до ≈ 100 МГц), который зависит от конструкции радиочастотных кабелей и мощности волны в кабеле. Уязвимое место – граница на поверхности внутри диэлектрика. Это опасное место с точки зрения пробоя. Пробивное напряжение:

$$U_{\text{проб}} = \frac{1}{\sqrt{2}} a \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right) E_{\text{проб}},$$

E

где $E_{\text{проб}}$ – пробивная напряженность поля в диэлектрике кабеля.

Применение коаксиальных кабелей:

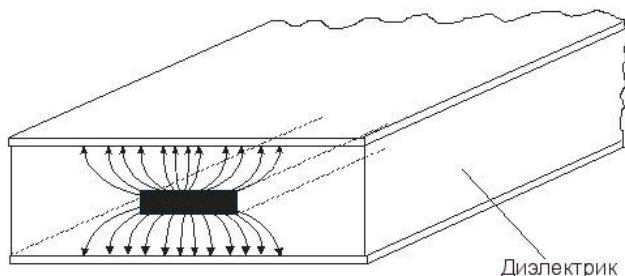
- гибкие кабели небольшой длины применяют в радиоэлектронной аппаратуре для соединения отдельных блоков и внутриблочных соединений до частот 10 ГГц;
- антенные фидеры используют до частот в сотни МГц; на магистральных линиях связи для передачи сигналов телевидения и многоканальной телефонии – до частот в 10 МГц. Иногда конструктивно объединяют несколько коаксиальных линий.

Полосковые линии

Полосковые (или ленточные) линии получили широкое распространение в связи с внедрением в технику сверхвысоких частот технологии печатных плат. Они используются преимущественно в сантиметровом и дециметровом диапазонах волн. Их изготавливают на основе диэлектрических пластин, покрытых металлической фольгой толщиной 10–100 мкм. В качестве диэлектрика используют фторопласт, стиролфлекс и другие высокочастотные диэлектрики (рис. 6.1.1).

Широкие пластины соединяются достаточно хорошо.

Если в качестве диэлектрика используется воздух, то потери в таком волноводе значительно меньше. В таких линиях устанавливается волна типа ТЕМ.



7. ОБЪЕМНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Резонатор – это колебательная система, используемая в сантиметровом и дециметровом диапазонах. Постепенное превращение колебательной системы в виде контура в резонатор показано на рис. 7.1.

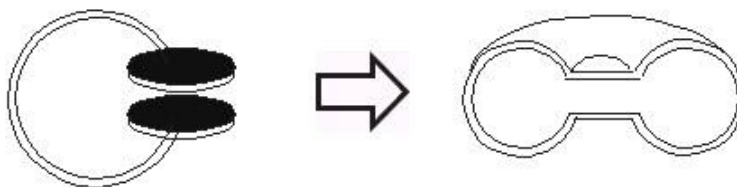


Рис. 7.1

Как любой контур, объемный резонатор характеризуется резонансной частотой, добротностью, полосой пропускания. В зависимости от типа колебаний резонатора он характеризуется несколькими резонансными частотами.

Добротность можно определить следующим образом

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R}$$

умножим числитель и знаменатель на I^2 :

$$Q = \omega_0 \frac{L I^2}{R I^2} = \frac{2\pi}{T} \frac{W}{P_0}$$

где P_0 – средняя за период мощность потерь в резонаторе, W – энергия, накопленная в резонаторе при резонансе.

Иначе говоря, добротность резонатора равна умноженному на 2π отношению энергии, накопленной при резонансе, к потерям энергии в резонаторе за период.

Возбуждается резонатор обычно петлей связи.

Поле в резонаторе характеризуется стоячей волной. В качестве резонаторов может выступать короткозамкнутый отрезок прямоугольного или круглого волновода. Для прямоугольного резонатора резонансные частоты определяются по формуле:

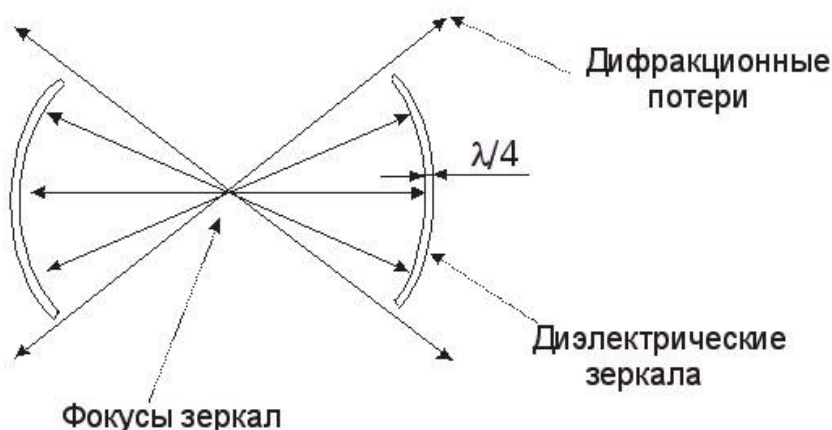
m, n, q .

$$f_0 = \frac{\sqrt{\epsilon\mu}}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{q}{\ell}\right)^2}$$

Обычно устанавливают простейшую структуру поля в резонаторе.

Так, для прямоугольного резонатора этой волной является волна E_{11} ($m=1, n=1$). Третий индекс $q=0$. Такая структура обозначается как

E_{110} и она идентична структуре поля типа E_{11} в прямоугольном волноводе на критической частоте.



На миллиметровых и субмиллиметровых волнах, а тем более в оптическом диапазоне, объемные резонаторы оказываются непригодными, так как на низших типах колебаний их размеры слишком малы, а на высших они теряют частотно-избирательные свойства.

В указанных диапазонах применяют открытые резонаторы (рис. 20). Эти резонаторы отличаются высокой добротностью (до $10^6 - 10^7$).

Из ранее изученного материала следует, что при толщине диэлектрической пластины $\frac{\lambda}{2}$ отражение происходит значительно эффективнее, чем от границы двух диэлектриков или границы с металлом, так как отраженные от двух границ сред волны складываются. При этом от первой границы отражение происходит с поворотом фазы на 180°.

7.1. Возбуждение резонаторов

Методы возбуждения объемных резонаторов и волноводов в принципе не отличаются. В них применяются те же элементы: штырь, петля, щель или отверстие.

Во многих частотных фильтрах применяются резонаторы с двумя элементами связи.

Электрическая схема может выглядеть следующим образом (рис. 7.1.1).

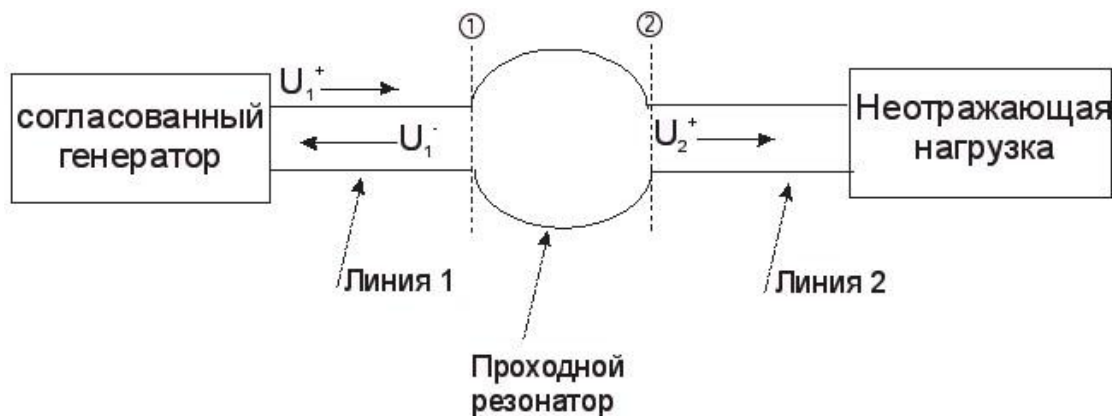


Рис. 7.1.1

Электрическая схема замещения показана на рис. 7.1.2.

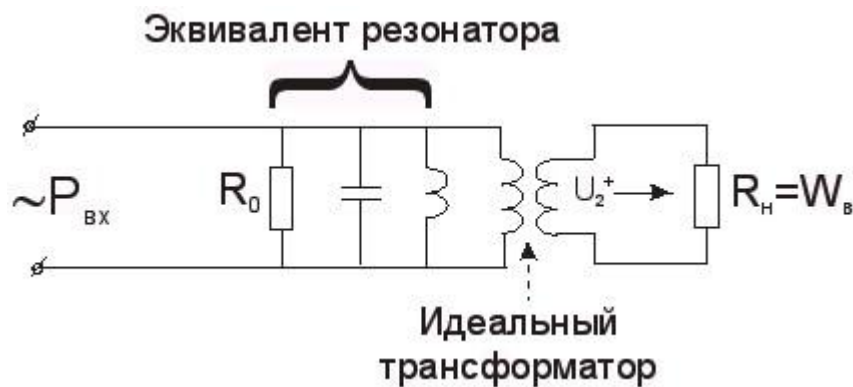


Рис. 7.1.2

Этот способ включения резонатора используют для вставки разрядников.

8. ЗАМЕДЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ (волноводы поверхностной волны)

На практике часто применяется гофрированная замедляющая структура. Такие устройства используются в качестве направляющей линии как составляющая часть сложной антенны (антенны поверхностной волны). Замедляющее действие структуры объясняется тем, что ниже поверхности S волна движется только в поперечном направлении (вдоль оси x), отражаясь от дна канавки гофра, и имеет нулевую поступательную скорость вдоль оси z (рис. 8.1).

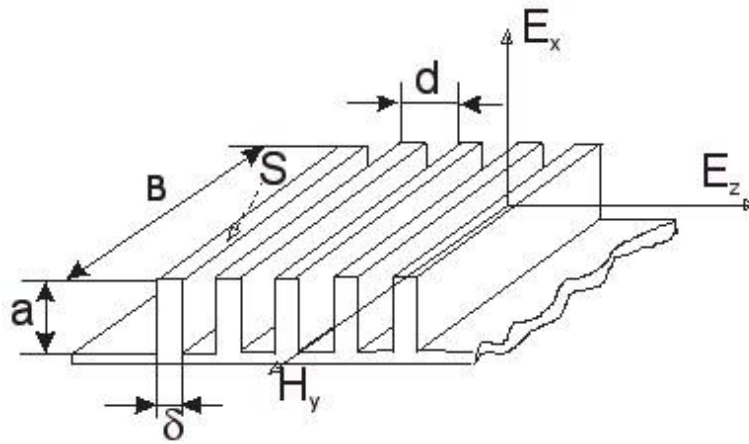


Рис. 8.1

Степень замедления пропорциональна той доле ее энергии, которая попадает в гофры. Так как $\left(\frac{d-\delta}{d} \right) \ll \frac{\lambda}{d}$, то в такой в линии (внутри гофра и 2

на поверхности S) может существовать только волна типа TEM с компонентами E_z и H_y . А волновое сопротивление равно

$$\frac{E_z}{H_y} = Z_{B0}.$$

Входное сопротивление короткозамкнутого отрезка линии длиной a равно:

$$Z_{вх} = i Z_{B0} \operatorname{tg} K_0 \cdot a.$$

Это сопротивление определяет напряжение между краями канавки:

$$\dot{U}_k = \dot{E}_z (d - \delta) = Z_{вх} H_y (d - \delta).$$

Сопротивление проводящего зубца толщиной δ равно 0.

Среднюю напряженность электрического поля в плоскости S определим, отнеся это напряжение к периоду гофров d , т.е.

$$\dot{E}_\tau = \frac{\dot{U}_k}{d} = E_z \left(1 - \frac{\delta}{d} \right) = Z_{вх} H_y \left(1 - \frac{\delta}{d} \right).$$

Отсюда усредненный поверхностный импеданс гофров:

$$Z_S^E = \frac{\dot{E}_\tau}{H_y} = i \left(1 - \frac{\delta}{d} \right) Z_{B0} \operatorname{tg} K_0 \cdot d.$$

$$: 0 < K_0 d < \frac{\pi}{2}.$$

Обычно используют случай: 0.

8.1. Спиральный волновод. Возбуждение волноводов поверхностной волны

Спиральная линия задержки (спиральный волновод) является простейшим устройством, замедляющим электромагнитную волну. Он широко используется в лампах бегущей волны и антенных устройствах. Замедление волны происходит за счет того, что электромагнитная волна вдоль провода распространяется приблизительно со скоростью света, тогда по оси конструкции волна будет замедляться (рис. 8.1.1).

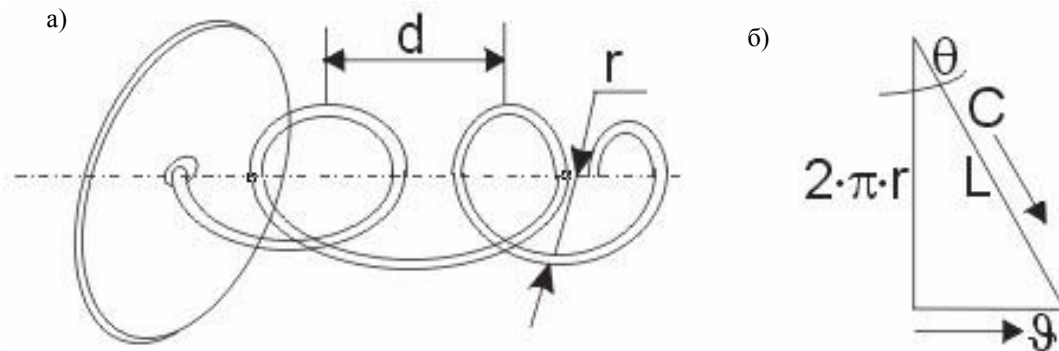


Рис. 8.1.1

Вычислить фазовую скорость распространения вдоль спирали можно из очевидных соотношений (рис. 8.1.1). d

Угол намотки спирали: $\operatorname{tg}\theta = \frac{d}{2\pi r}$, длина одного витка

$$L = \sqrt{(2\pi r)^2 + d^2} = \frac{d}{\sin\theta}. \text{ Тогда } \vartheta = C \sin\theta = C \frac{d}{L}.$$

Получается, что замедление в спирали определяется только ее геометрией и не зависит от частоты. Это подтверждается и более строгим анализом.

Возбуждение волноводов поверхностной волны

Точечные возбудители (штырь, петля, отверстие) в волноводах поверхностной волны использовать нельзя, так как распространяющиеся волны, возникающие вблизи возбудителя, уходят в пространство.

Идеальный возбудитель поверхностной волны представляет собой волновой фронт бесконечной протяженности, перпендикулярный оси волновода.

Возбудители можно строить по следующей схеме (рис. 8.1.2):

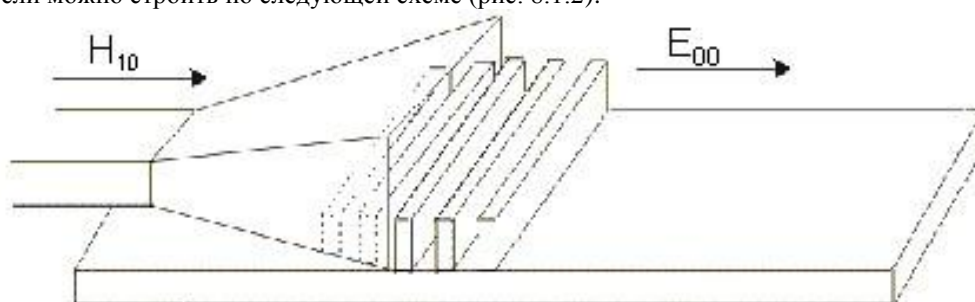


Рис. 8.1.2

Замедляющую структуру частично помещают внутрь рупора, раскрыв которого около 60° .

9. ЭЛЕМЕНТЫ ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА

Устройство, предназначенное для выполнения той или иной функции (возбуждение, передача, разделение, преобразование структуры поля электромагнитных волн, модуляции, фильтрации электромагнитного сигнала) называют волноводным узлом.

Эти узлы, как правило, представляют собой отдельный конструктивный блок. Комплекс волноводных узлов и участков волноводов образует волноводный тракт. Любая составная часть волноводного узла со специфическими свойствами называется волноводным элементом.

Каждый волноводный элемент создает в нем определенную нерегулярность (изменение формы или размеров волновода). Эти нерегулярности изменяют структуру поля, преобразуют волны.

9.1. Элементы коаксиальной линии. Волноводный изгиб. Реактивные элементы.

Короткозамыкающие поршни.

Соединение (рис. 9.1.1). Эквивалентная схема соединения показана на рис. 9.1.2.

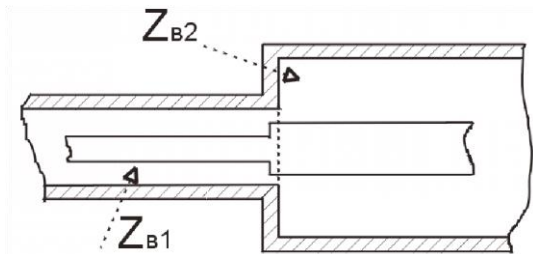


Рис. 9.1.1

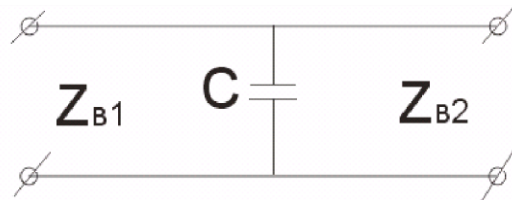


Рис. 9.1.2

В месте стыка создается дополнительное электрическое поле. Это поле носит реактивный характер. От получившейся ступеньки волна будет отражаться. Для уменьшения отражения применяют конусный переход (рис. 9.1.3).

Конусный переход с постоянным по длине отношением радиусов позволяет достичь хорошего согласования в полосе частот.

Согласование волноводов с одинаковыми номинальными размерами.

Длинные тракты из жестких волноводов для удобства производства и монтажа изготавливаются из отдельных волноводных секций, которые соединяются при помощи фланцев. Наиболее широкое применение нашло дроссельное соединение (рис. 9.1.4).

В точках АВ вместо электрического контакта дроссельное соединение образует короткозамкнутый отрезок $\ell = \frac{\lambda}{4}$, состоящий из двух отрезков. Здесь электрический контакт перенесен на расстояние $\frac{\lambda}{4}$, поэтому качество его не имеет значения.

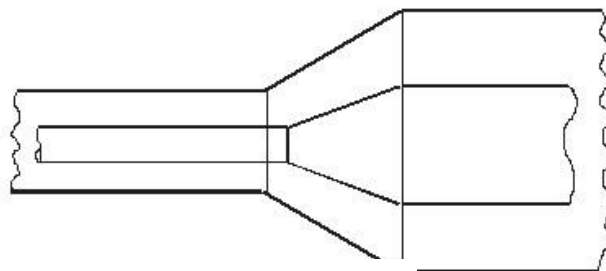


Рис. 9.1.3

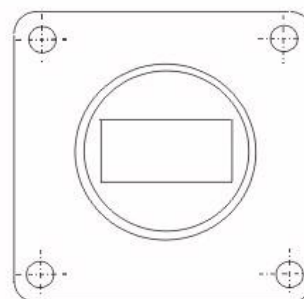
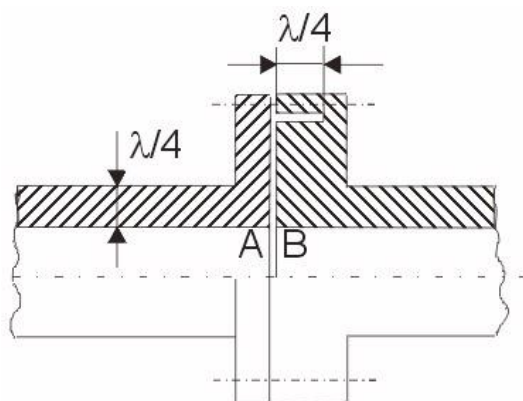


Рис. 9.1.4

Хорошо выполненное дроссельное соединение обеспечивает коэффициент отражения $\Gamma 1\%$ в полосе частот 20%.

Волноводный изгиб

Плавные изгибы с радиусом кривизны $R > \lambda$ несколько громоздки, но обеспечивают хорошее согласование. Отражение волны имеет место в сечении А и В, но коэффициенты отражения в этих сечениях противоположны по знаку (рис. 9.1.5).

Реактивные элементы

Волноводная диафрагма – тонкая металлическая пластинка в поперечной плоскости волновода, перекрывающая часть его сечения.

Эти диафрагмы почти не вносят активных потерь, но создают значительное местное поле за счет возбуждения нераспространяющихся волн.

Емкостная диафрагма и схема замещения показаны на рис. 9.1.6.

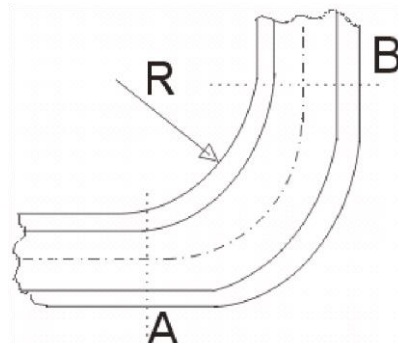


Рис. 9.1.5

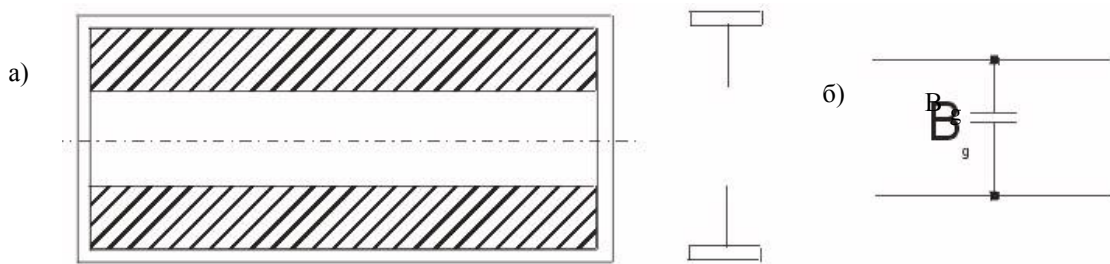


Рис. 9.1.6

Здесь B_g – реактивная проводимость диафрагмы.
Такая диафрагма вносит емкостную составляющую проводимости в месте ее расположения.
Недостатком является уменьшение допустимой мощности, передаваемой по волноводу.
Индуктивная диафрагма (рис. 9.1.7).

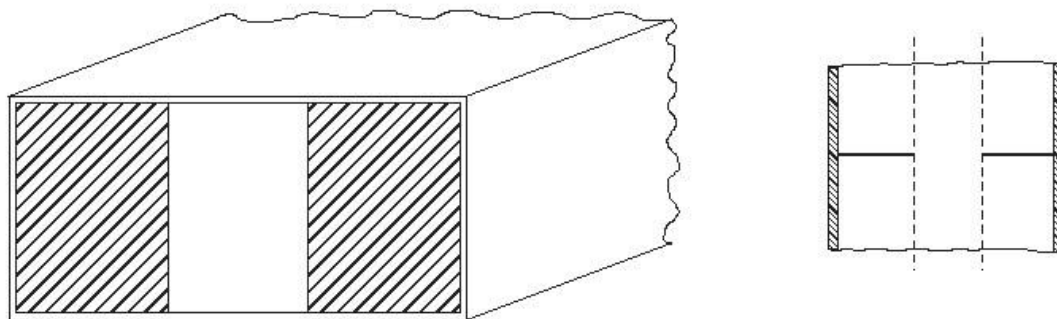


Рис. 9.1.7

Схема замещения изображена на рис. 9.1.8.
Где vg – реактивная проводимость диафрагмы. Здесь в реактивном поле преобладает магнитная составляющая.
Уменьшение напряжения пробоя незначительно, поэтому такие диафрагмы нашли широкое применение.

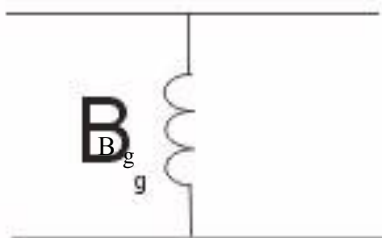


Рис. 9.1.9

34, б). Резонансное окно (рис. 9.1.10, а)); схема замещения изображена на рис.

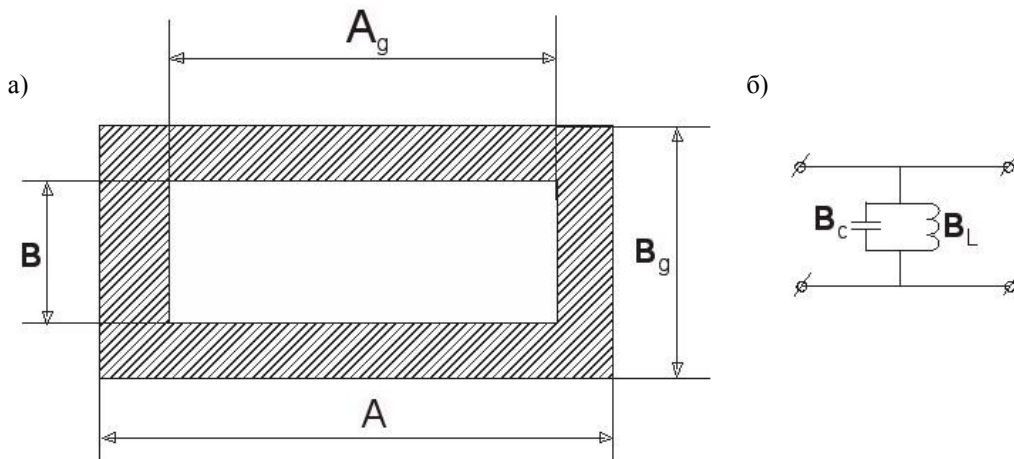


Рис. 9.1.10

Резонансная частота диафрагмы определяется из соотношения:

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{b^2 - b_g^2}{\epsilon a^2 - a_g^2}}$$

С уменьшением отверстия диафрагмы добротность возрастает, но обычно не превышает величины 10. Иногда такая диафрагма выполняется в виде вакуумноплотного слоя, имеющего малые потери на СВЧ.

Реактивные штыри и стержни.

Одиночный металлический штырь, погруженный в волновод и соединенный с его стенкой, создает значительное реактивное поле за счет токов проводимости, наведенных в нем набегающей волной (рис. 9.1.11).

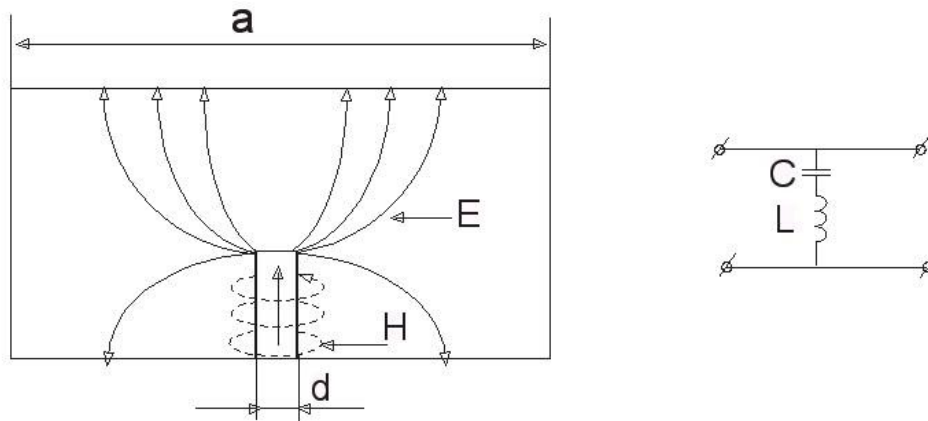


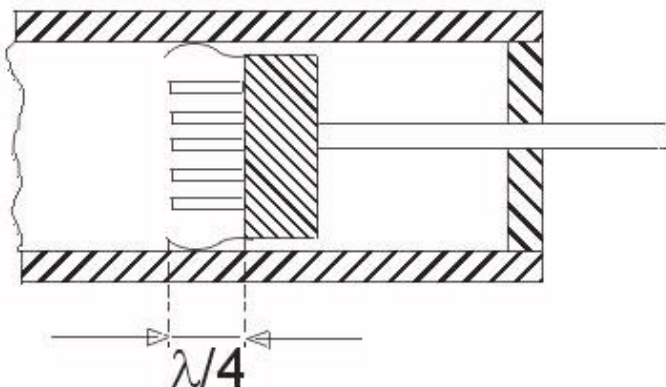
Рис. 9.1.11

При длине штыря $\frac{\lambda}{4} = \ell_0$ наступает резонанс. Толстые штыри с $\frac{d}{a} > 0,1$

имеют резонансную длину на 10 – 30 % короче. При ℓ_0 штырь имеет емкостную проводимость.

Короткозамыкающие поршни

В тех случаях, когда длину короткозамкнутого отрезка линии нужно регулировать, на его конце



устанавливают поршень. Он отражает всю падающую на него волну, применяется для настройки объемных и коаксиальных резонаторов. На рис. 36 изображена одна из конструкций поршня. Недостатком такого устройства является постепенное изнашивание контактных лепестков.

9.2 Неотражающие устройства.. Оконечные нагрузки. Фильтры типов волн. Вращающееся сочленение.

Диэлектрический фазовращатель. Функцией фазовращателя является создание регулируемой разности фаз волны между его входом и выходом.

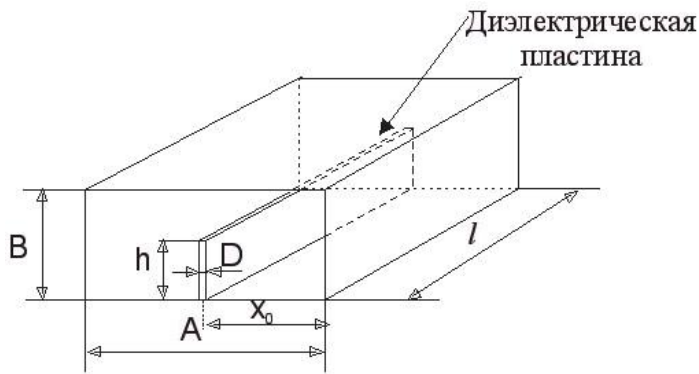


Рис. 9.2.1

На рис. 9.2.1 изображен вариант фазо вращателя.

В такой конструкции на длине ℓ получим следующий угол, на который изменится фаза:

$$\Delta \left(+ (\epsilon - 1) \frac{k}{\sqrt{k}} \frac{\Delta S}{S} \sin 2 \left\{ \frac{\pi}{a} x_0 \right\} \right)$$

где $\Delta S = h d$, $S = a b$, а отн о-

шение $\frac{k}{\sqrt{k}} = \frac{2 \pi f}{\left[C \sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}}{f} \right)^2} \right]}$.

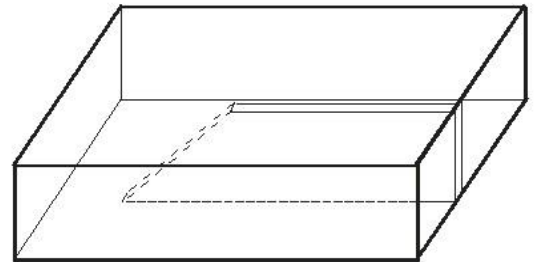
Пластина вызывает наибольшее замедление волн, находясь в середине волновода.

Оконечные нагрузки

Для полного поглощения распространяющейся волны служат оконечные нагрузки (рис. 9.2.2).

Суммарное затухание волны на пути до замкнутого конца и обратно равно 2ℓ .

Подбором диэлектрика пластины можно добиться коэффициента отражения не более 5 %.



Фильтры типов волн

Для разделения либо избирательного подавления волн используются структурные отличия электромагнитных полей и волн различных типов.

Примером такого устройства является разделительный поляризационный фильтр, используемый в радиорелейных трактах (рис. 9.2.3).

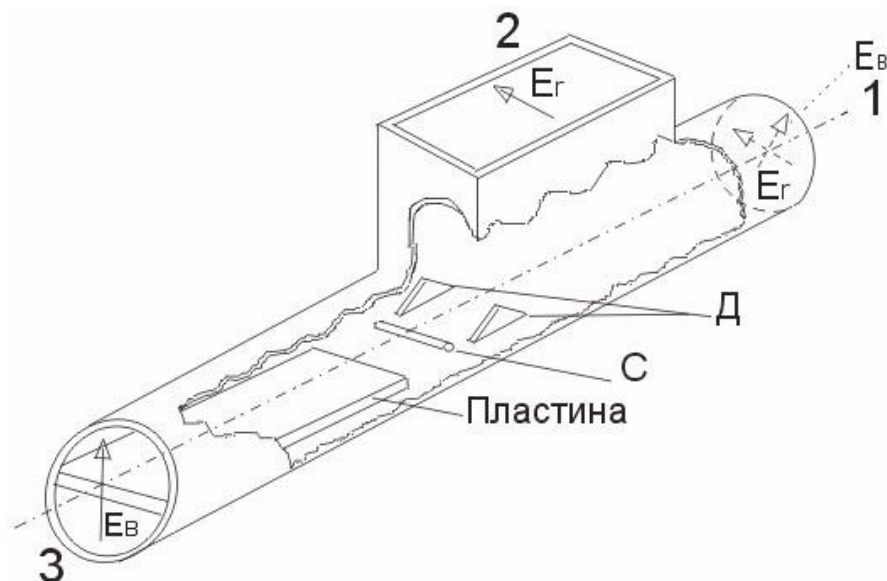
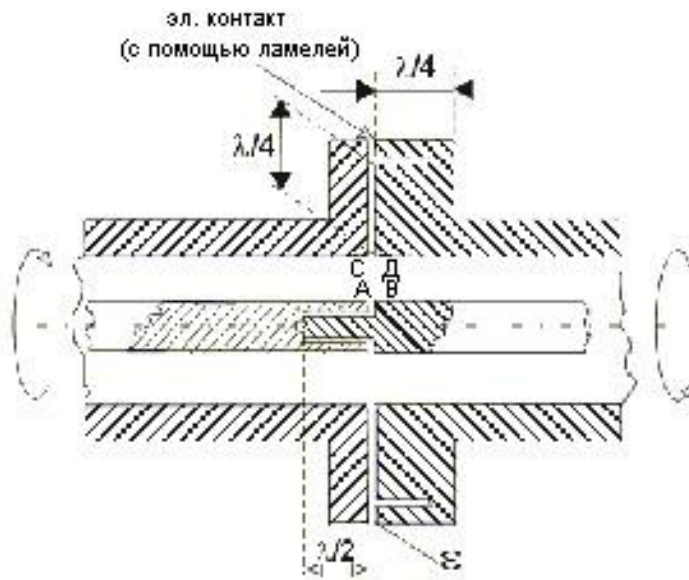


Рис. 9.2.3

Н

На вход 1 фильтра поступает волна типа H_{11} с вертикальной и горизонтальной поляризациями. Вертикально поляризованная волна беспрепятственно проходит в плечо 3. В начале плеча 2 расположены две параллельных треугольных пластины Т, создающих запертый волновод для волны E_v . Волна E_r отражается от пластины П полностью и проходит в плечо 2. Для согласования плеч предусмотрены индуктивный стержень С и диафрагма Д. С их помощью добиваются отсутствия отражений в каждом из плеч для волны соответствующей поляризации.



подпружиненных ламелей.

Вращающееся сочленение

Для питания антенны с круговым вращением или других подобных устройств необходима конструкция сочленения, обеспечивающая стабильность передачи при вращении одной части фидера (волновода) относительно другой. Рассмотрим вращающееся сочленение на основе коаксиальной конструкции (рис. 9.2.4).

Здесь используется два дроссельных перехода. В центральном стержне длина этого перехода равна $\frac{\lambda}{2}$, что 2 переносит короткое замыкание в точки АВ. Второй дроссельный переход похож на токовый у неподвижного соединения. Отличие состоит в том, что этот дроссель состоит из двух четверть волновых. Такая конструкция позволяет в точке Е иметь электрический контакт с помощью скользящих контактов в виде

9.3. Направленный ответвитель. Многоплечные узлы. Коаксиальный кольцевой мост (гибридное кольцо).

Часто возникает необходимость изъять из основного фидера (волновода) часть мощности, например, для целей измерения. В этом случае применяют направленные ответвители. Одна из конструкций представлена на рис. 9.3.1.

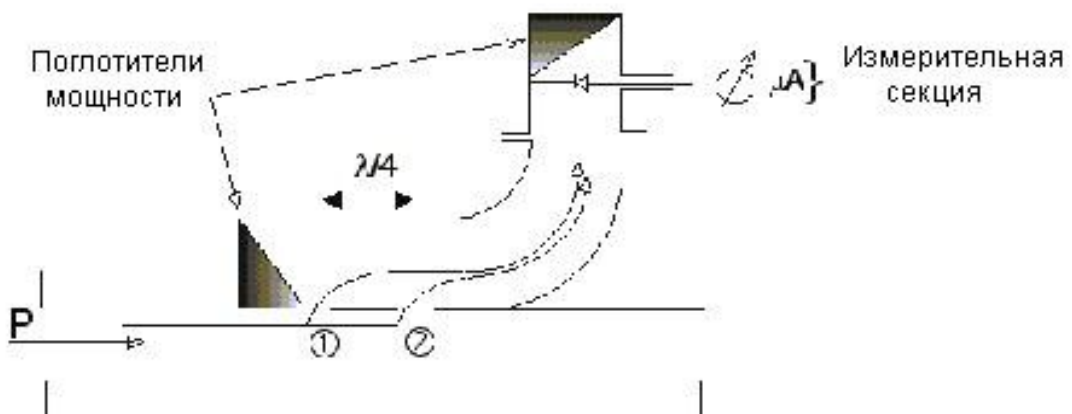


Рис. 9.3.1

К основному волноводу присоединен дополнительный. В смежных стенках имеются отверстия на расстоянии l . Размеры этих отверстий d калиброваны так, чтобы через них проходила необходимая часть мощности из основного волновода (например, одна тысячная). Измерив эту мощность можно судить о мощности в основном волновод. Мощность, просочившаяся через отверстия в сторону измерительной секции складывается, а та часть, которая направлена влево (в сторону поглотителя) взаимно компенсируется, так как разность фаз волн, прошедших отверстия 1 и 2 равна 180° , так как разность пути l .

Многоплечные узлы

Разветвление в плоскости H (рис. 9.3.2).

Согласующая диафрагма нужна для того, чтобы не было отражения от стенки волновода.

Мощность P_1 делится по-

$$P_1 = P_2 + P_3 = \frac{1}{2} P_1 + \frac{1}{2} P_1$$

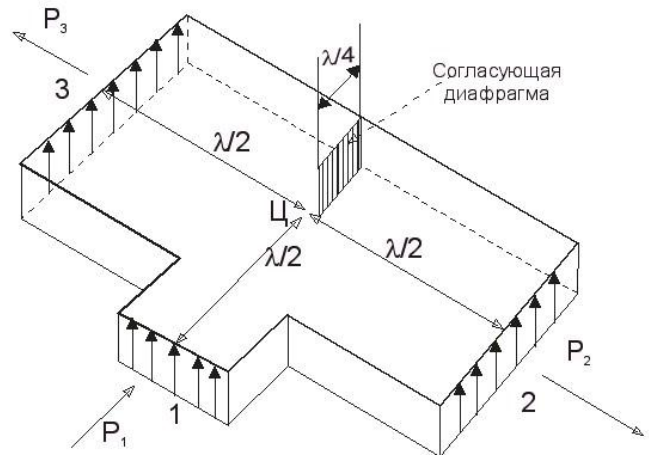


Рис.9.3.2

Разветвление в плоскости E (рис. 9.3.3).

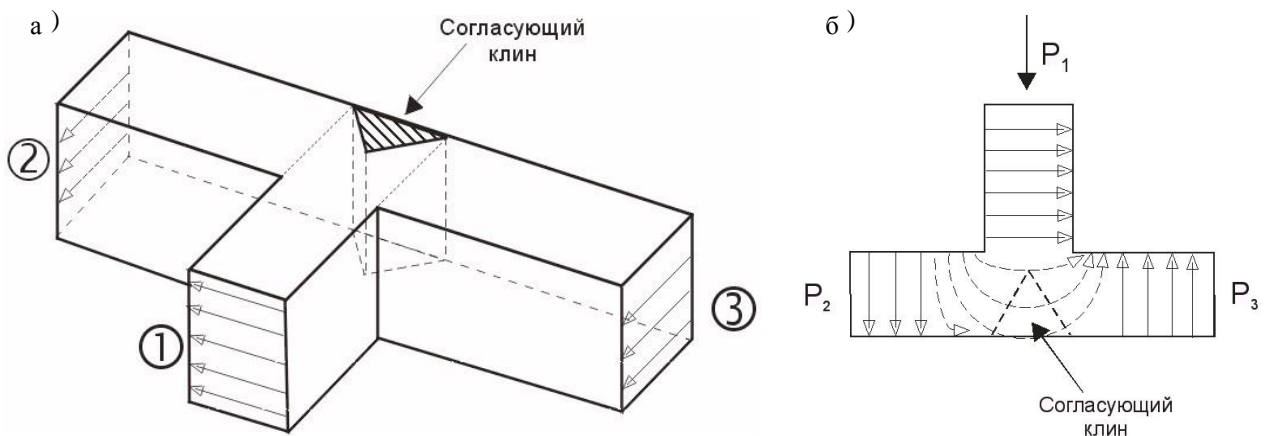


Рис. 9.3.3

На рисунке 9.3.3, б) видно, что поля на выходах 2 и 3 противофазны.

Коаксиальный кольцевой мост (гибридное кольцо)

Кольцевой мост (рис. 9.3.4) имеет длину $1,5\lambda$.

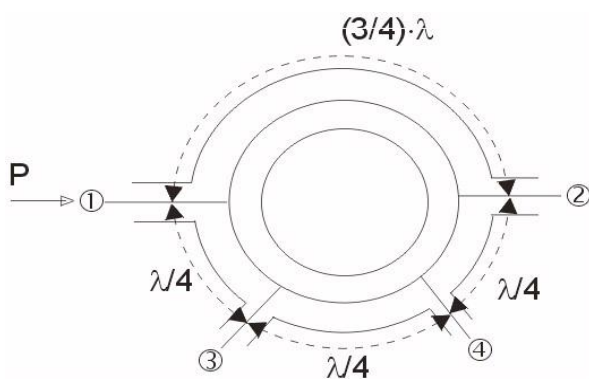


Рис. 9.3.4

Напряжение в точках 2 и 3 между собой находятся в противофазе. В точке 4 будет узел напряжения (т.е. оно будет равно 0). В точке 3 – синфазный с «1». В точке 2 – противофазный с «1».

9.4. Антенный переключатель. Гиратор. Циркулятор

Антенный переключатель предназначен для коммутирования общей антенны от передатчика к приемнику и обратно.

Этот переключатель (рис. 9.4.1) выполняется в волновом варианте. При работе передатчика оба разрядника пробиты – отрезки длиной являются изоляторами, вход приемника закорочен. Антенна получает сигнал от передатчика.

При приеме сигнала от антенны оба разрядника работают в режиме холостого хода (т.е. не пробиты). Вход приемника открыт для слабого сигнала от антенны.

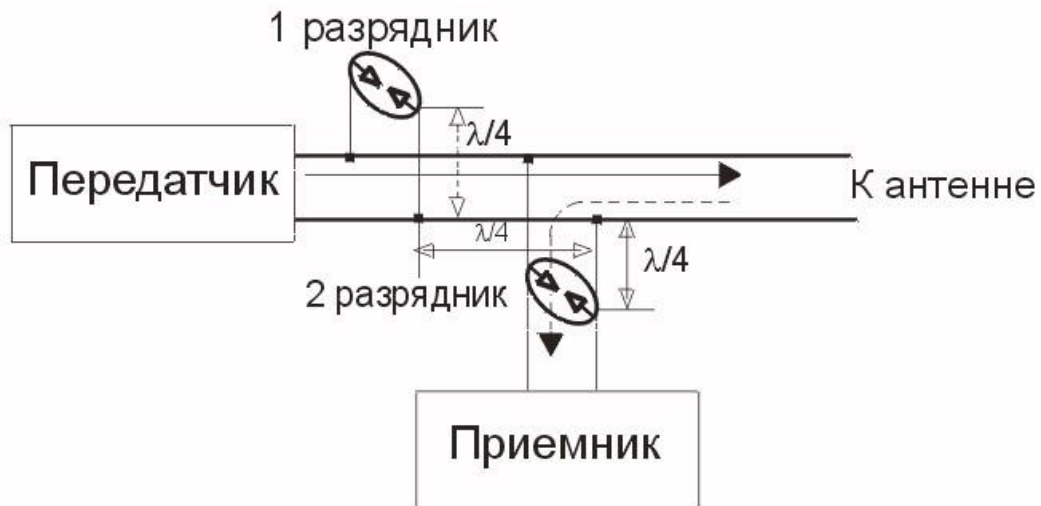


Рис. 9.4.1

Гиратор

У ферритового стержня, находящегося в магнитном поле, есть свойство поворачивать плоскость поляризации волны. Это свойство называется эффектом Фарадея и используется в устройстве, которое называется

гиратором. Поворот плоскости поляризации реализуется на волне H_{11} в круглом волноводе, поперечная структура которой близка к плоской волне (рис. 9.4.2).

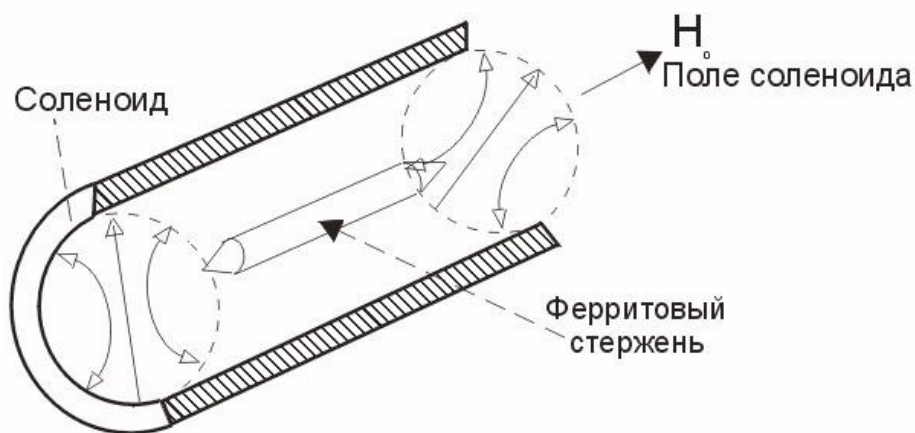


Рис. 9.4.2

Тонкий ферритовый стержень помещается на оси волновода. Поле соленоида может быть постоянным или регулируемым. В последнем случае и угол поворота поля также будет регулируемым.

Циркулятор

Конструкция циркулятора изображена на рис. 9.4.3.

Переход от прямоугольного волновода к круглому обеспечивает переход от волны H_{10} к волне типа H_{11} . Волна из плеча ① беспрепятственно проходит фильтр 1. Волна беспрепятственно проходит отверстие ③. Затем гиратор поворачивает плоскость поляризации и волна через отверстие ④, фильтр 2 и переход П2 проходит плечо ②. Из плеча ② волна через гиратор проходит в плечо ③. Точно также осуществляется переход из плеча ③ в плечо ④ и из плеча ④ в ①. Такое устройство широко используется для электрически управляемого переключателя.

10. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

Принципы построения систем передачи.

В оптических системах передачи применяются те же принципы образования многоканальной связи, что и в обычных системах передачи по электрическим кабелям, а именно, принципы частотного и временного разделения каналов.

При оптической системе передачи электрический сигнал, создаваемый частотным или временным методом, модулирует оптическую несущую и затем передается по оптическому кабелю.

Возможны два вида модуляции: внешняя и внутренняя. При внутренней модуляции электрический сигнал непосредственно воздействует на излучение лазера, обеспечивая соответствующую интенсивность сигнала и его форму. При внешней модуляции используется специальное модулирующее устройство, с помощью которого осуществляется воздействие передаваемого сигнала на уже сформированный луч лазера.

Для систем с полупроводниковыми лазерами применяется, как правило, внутренняя модуляция.

В основном, используется метод модуляции интенсивности (МИ) оптической несущей и закон изменения мощности оптического излучения повторяет закон изменения модулирующего сообщения (прототип амплитудной модуляции). Частотная и фазовая модуляции практически не применяются из-за шумового характера полупроводниковых источников излучения (спектр имеет определенную полосу частот). В таких системах на передаче используется полупроводниковый лазер, а прием осуществляется фотодетектором. В силу квадратичной характеристики его выходной ток пропорционален входной мощности.

Оптические системы передачи являются, как правило, цифровыми. Это обусловлено, в частности, тем, что передача аналоговых сигналов требует высокой степени линейности промежуточных усилителей, которую трудно обеспечить в оптических системах.

Особенность оптических цифровых систем состоит в том, что передача ведется только однополярными импульсами электрического сигнала, модулирующего оптическую несущую. Модулируется не амплитуда, а мощность оптического излучения.

Наиболее распространенной волоконно-оптической системой связи является цифровая система с временным разделением каналов и импульсно-кодовой модуляцией интенсивности излучения источника. Двусторонняя связь осуществляется по двум волоконным световодам. По одному в направлении А – В, по другому в направлении В – А, например, на частоте $f = 2,3 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ (1,3 мкм).

Если провести аналогию между ВОЛС и линией связи по электрическому кабелю, то световоду соответствует одна пара проводников электрического кабеля. В этом смысле структуру связи по оптическим кабелям можно назвать однополосной, четырехпроводной.

В реальных условиях все элементы оптического передатчика и приемника изготавливаются в виде компактного устройства – квантовоэлектронного модуля (КЭМ).

Структурная схема волоконно-оптической связи с ИКМ приведена на рис.

В состав КЭМ на передаче входят: полупроводниковый источник излучения с электронной схемой возбуждения, согласующее устройство и разъемный соединитель, с помощью которого осуществляется подсоединение световода и ввод в него оптического сигнала.

В состав КЭМ на приеме входят согласующее устройство, разъемный соединитель, полупроводниковый фотодетектор, преобразующий оптический сигнал в электрический, и малошумящий усилитель.

Конструктивно эти модули (размером в оптическую коробку) содержат несколько микросхем, помещенных в герметичный корпус с оптическим разъемом.

Через 10 – 50 км вдоль оптической линии располагаются линейные регенераторы. В них сигнал восстанавливается и усиливается.

Структурная схема линейного регенератора (Л.Р.) приведена на рис. 10.1.

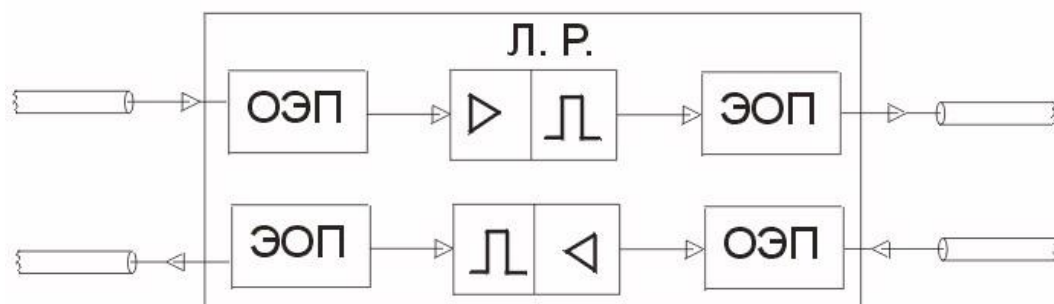


Рис. 10.1

Оптический кабель подключается к л.р. с помощью разъемного соединителя.

Аналоговые оптические системы используются для организации широкополосных каналов (например, телевидение).

10.1. Длина регенерационного участка

Необходимость устанавливать в линии оптической связи регенераторы обусловлена в основном двумя факторами: затуханием в оптическом кабеле и дисперсией.

Затухание ограничивает длину кабеля по потерям в тракте передачи. Дисперсия связана с различием фазовой скорости составляющих спектра сигнала. Это приводит к размытию (расширению) импульса, передаваемого по линии (рис. 10.1.1).

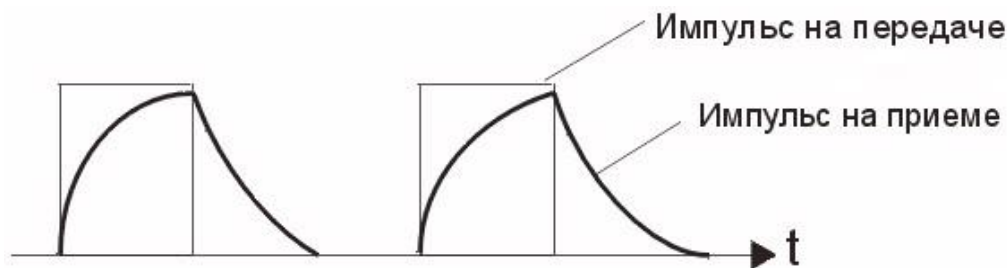


Рис. 10.1.1

С учетом допустимого затухания и допустимого искажения (определяемого межсимвольной интерференцией) выбирается длина регенерационного участка.

Обычно длина регенерационного участка в несколько раз больше, чем эта длина для радиочастотного кабеля. С другой стороны, длина регенерационного участка падает с ростом скорости передачи (это определяется дисперсией).

Кроме указанных двух факторов существует понятие строительной длины оптического кабеля. Эта длина зависит от степени сложности конструкции кабеля и технологических возможностей производства.

Для сравнения приведем некоторые цифровые данные: в коаксиальных кабелях регенерационные участки составляют 1,5 – 6 км, а в оптических 10 – 30 км.

Строительная же длина составляет от нескольких сотен метров до 1 км.

4.3. Практические занятия

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование практической работы</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	1.	Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях.	4	Работа в малых группах (2 часа)
2	1.	Модуляция сигнала.	3	-
3	2.	Дифракция электромагнитных волн.	2	Работа в малых группах (1 час)
4	4.	Законы отражения и преломления света.	8	Работа в малых группах (1 час)
5	5.	Фурье-анализ сигнала.	6	Работа в малых группах (1 час)
6	6.	Сложение колебаний и волн.	4	Работа в малых группах (1 час)
7	7.	Скин-эффект.	4	Работа в малых группах (1 час)
8	8.	Электростатическое поле от различного распределения зарядов.	4	Работа в малых группах (1 час)
ИТОГО			35	8

4.5. Контрольные мероприятия: контрольная работа

Цель: Развить навыки студентов по использованию приобретённых знаний в решении задач и в ответах на конкретные вопросы.

Структура: Каждое индивидуальное задание предполагает решение задач ответ студента на вопросы по 5 темам:

1. Электромагнитное поле
2. Энергия электромагнитного поля. Теория единственности.
3. Волны у границы раздела двух сред.
4. Излучение и дифракция электромагнитного поля.
5. Волны и резонаторы.

Основная тематика: Электромагнитные поля.

Рекомендуемый объем: Пояснительная записка объемом 10 - 15 страниц должна содержать титульный лист, задание, описание выполняемых действий по каждому разделу и полученные результаты.

Выдача задания и прием кр проводится в соответствие с календарным учебным графиком

Оценка	Критерии оценки контрольной работы
отлично	Во время защиты контрольной работы студент демонстрирует знание все основных определений и продемонстрировал уверенное умение использовать методы расчета основных показателей усилительных схем, владение достаточным уровнем понимания материала, и способностью самостоятельно высказать мысль на научно-техническом языке.

хорошо	Во время защиты контрольной работы студент показал не полное понимание материала и навыков владения практическими приемами.
удовлетворительно	Во время защиты контрольной работы студент показал слабое понимание материала и навыков владения практическими приемами.
неудовлетворительно	Во время защиты контрольной работы студент не продемонстрировал теоретических знаний по теме работы, либо не показал ни каких практических навыков..

5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

<i>№, наименование разделов дисциплины</i>	<i>Компетенции</i>	<i>Кол-во часов</i>	<i>Компетенции</i>		<i>Σ комп.</i>	<i>t_{ср}, час</i>	<i>Вид учебных занятий</i>	<i>Оценка результатов</i>
			<i>ОПК</i>					
			<i>З</i>					
1	2	3	4	5	6	7		
1. Электромагнитное поле		18	+		1	18	Лк, ПЗ, кр СРС	ЭКЗАМЕН
2. Энергия электромагнитного поля. Теория единственности		14	+		1	14	Лк, ПЗ, кр СРС	ЭКЗАМЕН
3. Волны у границы раздела двух сред		14	+		1	14	Лк, ПЗ, кр СРС	ЭКЗАМЕН
4. Излучение и дифракция электромагнитного поля		20	+		1	20	Лк, ПЗ, кр СРС	ЭКЗАМЕН
5. Волны и резонаторы		19	+		1	19	Лк, ПЗ, кр СРС	ЭКЗАМЕН
6. Возбуждение волноводов		10	+		1	10	Лк, ПЗ, кр СРС	ЭКЗАМЕН
7. Объемные резонаторы		15	+		1	15	Лк, ПЗ, СРС	ЗАЧЕТ
8. Замедляющие системы		10	+		1	10	Лк, СРС	ЗАЧЕТ
9. Элементы волноводного тракта		19	+		1	19	Лк, ПЗ, СРС	ЗАЧЕТ
10. Волоконно-оптические системы передачи		14	+		1	14	Лк, ПЗ, СРС	ЗАЧЕТ
<i>всего часов</i>		153	153		1	153		

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Фрике, К. Вводный курс цифровой электроники : учеб. пособие для вузов / К. Фрике; Пер. с нем. - 2-е изд., испр. - Москва : Техносфера, 2004. - 432 с. - (Мир электроники).

7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№	Наименование издания	Вид занятия (Лк, ЛР, ПЗ)	Количество экземпляров в библиотеке, шт.	Обеспеченность, (экз./ чел.)
1	2	3	4	5
Основная литература				
1.	Зильберман, Г. Е., Электричество и магнетизм : учебное пособие / Г. Е. Зильберман. - 2-е изд. - Долгопрудный : Интеллект, 2008. - 376 с.	Лк, ПЗ, кр	50	1
2.	Нефедов, Евгений Иванович, Электромагнитные поля и волны: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Инфокоммуникационные технологии и системы связи", квалификации (степени) "бакалавр" и "магистр" / Е. И. Нефедов. - Москва : Академия, 2014. - 368 с. - (Высшее образование: Бакалавриат)	Лк., ПЗ, кр	9	0,5
Дополнительная литература				
3	Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие для вузов / Ю. В. Елисеев, И. П. Белоедова ; ред. Е. С. Колечицкий. - Москва : МЭИ, 2008. - 248 с	Лк, ПЗ, кр	15	0,8
4	Башарин, С.А, Теоретические основы электротехники : учебник / С. А. Башарин, В. В. Федоров. - 5-е изд., перераб. и доп. - Москва : Академия, 2013. - 384 с. - (Бакалавриат).	Лк, ПЗ, кр	10	0,6

8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ
http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=.

2. Электронная библиотека БрГУ
<http://ecat.brstu.ru/catalog>.

3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online»
<http://biblioclub.ru>.

4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань»
<http://e.lanbook.com>.

5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам"
<http://window.edu.ru>.

6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru>.

7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ)
<https://uisrussia.msu.ru/>.

8. Национальная электронная библиотека НЭБ
<http://xn--90ax2c.xn--p1ai/how-to-search/>.

9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению практическим работам

Практическое занятие №1

Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях.

Цель работы:

Изучение движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях и определение удельного заряда электрона e/m с помощью катушек Гельмгольца.

Задание:

1. Изучить теоретические сведения.

Порядок выполнения:

1. Решить предложенные задачи.

Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Цель работы
2. Задание
3. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
4. Заключение.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом разделе данной дисциплины.

Основная литература

Зильберман, Г. Е., Электричество и магнетизм : учебное пособие / Г. Е. Зильберман. - 2-е изд. - Долгопрудный : Интеллект, 2008. - 376 с.

Нефедов, Евгений Иванович, Электромагнитные поля и волны: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Инфокоммуникационные технологии и системы связи", квалификации (степени) "бакалавр" и "магистр" / Е. И. Нефедов. - Москва : Академия, 2014. - 368 с. - (Высшее образование: Бакалавриат)

Дополнительная литература

Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие для вузов / Ю. В. Елисеев, И. П. Белоедова ; ред. Е. С. Колечицкий. - Москва : МЭИ, 2008. - 248 с

Башарин, С.А., Теоретические основы электротехники : учебник / С. А. Башарин, В. В. Федоров. - 5-е изд., перераб. и доп. - Москва : Академия, 2013. - 384 с. - (Бакалавриат).

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Какая сила действует на заряженную частицу в электрическом поле с напряженностью E ?
2. Как определить направление силы Лоренца?
3. Каковы возможные траектории движения заряженных частиц в однородном постоянном магнитном поле?

Практическое занятие №2

Модуляция сигнала.

Цель работы:

Исследование процессов модуляции.

Задание:

1. Изучить теоретические сведения.

Порядок выполнения:

1. Рассмотреть при дискретном модулирующем сигнале, содержащем три импульса различной длины.
2. Рассмотреть разложение в ряд Фурье.

Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Цель работы
2. Задание
3. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
4. Заключение.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным во втором разделе данной дисциплины.

Основная литература

Зильберман, Г. Е., Электричество и магнетизм : учебное пособие / Г. Е. Зильберман. - 2-е изд. - Долгопрудный : Интеллект, 2008. - 376 с.

Нефедов, Евгений Иванович, Электромагнитные поля и волны: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Инфокоммуникационные технологии и системы связи", квалификации (степени) "бакалавр" и "магистр" / Е. И. Нефедов. - Москва : Академия, 2014. - 368 с. - (Высшее образование: Бакалавриат)

Дополнительная литература

Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие для вузов / Ю. В. Елисеев, И. П. Белоедова ; ред. Е. С. Колечицкий. - Москва : МЭИ, 2008. - 248 с

Башарин, С.А., Теоретические основы электротехники : учебник / С. А. Башарин, В. В. Федоров. - 5-е изд., перераб. и доп. - Москва : Академия, 2013. - 384 с. - (Бакалавриат).

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Модуляция – это...?
2. Главная особенность модуляции?
3. Что используют в качестве несущего сигнала?

Практическое занятие №3

Дифракция электромагнитных волн.

Цель работы:

Изучить явление дифракции электромагнитной волны

Задание:

1. Рассмотреть дифракцию Френеля на отверстии в виде кольца. Осуществить проверку полученных результатов с помощью зон Френеля.
2. Рассмотреть дифракцию Фраунгофера от щели при падении плоской световой волны под углом θ .

3 Рассмотреть дифракцию Фраунгофера от N щелей при падении волны под углом θ ф .

4 Рассмотреть дифракцию Фраунгофера от края непрозрачного прямого экрана.

.

Порядок выполнения:

1. Решить предложенные задачи.

Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Цель работы
2. Задание
3. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
4. Заключение.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

Основная литература

Зильберман, Г. Е., Электричество и магнетизм : учебное пособие / Г. Е. Зильберман. - 2-е изд. - Долгопрудный : Интеллект, 2008. - 376 с.

Нефедов, Евгений Иванович, Электромагнитные поля и волны: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Инфокоммуникационные технологии и системы связи", квалификации (степени) "бакалавр" и "магистр" / Е. И. Нефедов. - Москва : Академия, 2014. - 368 с. - (Высшее образование: Бакалавриат)

Дополнительная литература

Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб.пособие для вузов / Ю. В. Елисеев, И. П. Белоедова ; ред. Е. С. Колечицкий. - Москва : МЭИ, 2008. - 248 с

Башарин, С.А, Теоретические основы электротехники : учебник / С. А. Башарин, В. В. Федоров. - 5-е изд., перераб. и доп. - Москва : Академия, 2013. - 384 с. - (Бакалавриат).

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Дайте понятие дифракции.
2. Расскажите об устройстве и назначении дифракционной решетки проходящего света.
3. В чем сущность принципа Гюйгенса-Френеля?

Практическое занятие №4

Законы отражения и преломления света.

Цель работы:

Применение законов отражения и преломления света при решении задач.

Задание:

- 1). Каким должен быть преломляющий угол α призмы из стекла с показателем преломления $n = 1,5$, чтобы свет линейной поляризации мог пройти сквозь нее без потерь на отражение?
- 2). Неполяризованный почти монохроматический пучок света падает на плоскую границу раздела диэлектриков. Определить коэффициент отражения R и коэффициенты деполаризации 2 , 1 r отраженного и преломленного света, если угол падения равен углу Брюстера.

.

Порядок выполнения:

1. Решить предложенные задачи.

Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

5. Цель работы
6. Задание
7. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
8. Заключение.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

Основная литература

Зильберман, Г. Е., Электричество и магнетизм : учебное пособие / Г. Е. Зильберман. - 2-е изд. - Долгопрудный : Интеллект, 2008. - 376 с.

Нефедов, Евгений Иванович, Электромагнитные поля и волны: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Инфокоммуникационные технологии и системы связи", квалификации (степени) "бакалавр" и "магистр" / Е. И. Нефедов. - Москва : Академия, 2014. - 368 с. - (Высшее образование: Бакалавриат)

Дополнительная литература

Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие для вузов / Ю. В. Елисеев, И. П. Белоедова ; ред. Е. С. Колечицкий. - Москва : МЭИ, 2008. - 248 с

Башарин, С.А, Теоретические основы электротехники : учебник / С. А. Башарин, В. В. Федоров. - 5-е изд., перераб. и доп. - Москва : Академия, 2013. - 384 с. - (Бакалавриат).

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте законы отражения и преломления света.
2. Что показывает абсолютный показатель преломления?
3. Что показывает относительный показатель преломления?

Практическое занятие №5

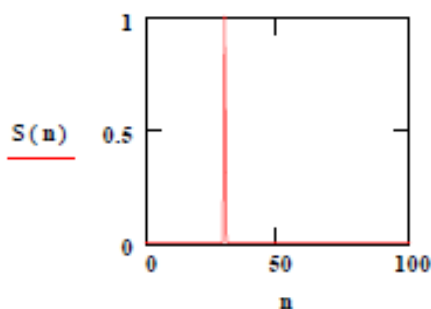
Фурье-анализ сигнала.

Цель работы:

Изучение спектров сигнала.

Задание:

1) Выполнить прямое и обратное преобразование Фурье для δ -функции $m := 30$, $n := 0..100$ $S(n) := \delta(m, n)$



2) Задать три прямоугольных импульса и выполнить прямое и обратное преобразование Фурье.

Порядок выполнения:

1. Решить предложенные задачи.

Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

9. Цель работы

10. Задание

11. Поэтапное выполнение всех заданий варианта

12. Заключение.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

Основная литература

Зильберман, Г. Е., Электричество и магнетизм : учебное пособие / Г. Е. Зильберман. - 2-е изд. - Долгопрудный : Интеллект, 2008. - 376 с.

Нефедов, Евгений Иванович, Электромагнитные поля и волны: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Инфокоммуникационные технологии и системы связи", квалификации (степени) "бакалавр" и "магистр" / Е. И. Нефедов. - Москва : Академия, 2014. - 368 с. - (Высшее образование: Бакалавриат)

Дополнительная литература

Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие для вузов / Ю. В. Елисеев, И. П. Белоедова ; ред. Е. С. Колечицкий. - Москва : МЭИ, 2008. - 248 с

Башарин, С.А, Теоретические основы электротехники : учебник / С. А. Башарин, В. В. Федоров. - 5-е изд., перераб. и доп. - Москва : Академия, 2013. - 384 с. - (Бакалавриат).

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Теорема Фурье.
2. Что такое дискретное преобразование Фурье?
3. Что такое спектральное преобразование Фурье?

Практическое занятие №6

Сложение колебаний и волн.

Цель работы:

Изучение гармонических колебаний, происходящих в одном или в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Задание:

- 1). В направлении оси OZ установилась стоячая электромагнитная волна с электрической составляющей $E = E_m \cos(kz) \cos(\omega t)$. Найти магнитную составляющую волны $B(z, t)$. Изобразить картину распределения магнитной составляющей волны в разные моменты времени.
- 2). В вакууме вдоль оси OZ установилась стоячая электромагнитная волна с электрической составляющей $E = E_m \cos(kz) \cos(\omega t)$. Найти Z-проекцию вектора Пойнтинга $S_z(z, t)$ и ее среднее за период значение.

Порядок выполнения:

1. Решить предложенные задачи.

Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

13. Цель работы

14. Задание
15. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
16. Заключение.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

Основная литература

Зильберман, Г. Е., Электричество и магнетизм : учебное пособие / Г. Е. Зильберман. - 2-е изд. - Долгопрудный : Интеллект, 2008. - 376 с.

Нефедов, Евгений Иванович, Электромагнитные поля и волны: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Инфокоммуникационные технологии и системы связи", квалификации (степени) "бакалавр" и "магистр" / Е. И. Нефедов. - Москва : Академия, 2014. - 368 с. - (Высшее образование: Бакалавриат)

Дополнительная литература

Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие для вузов / Ю. В. Елисеев, И. П. Белоедова ; ред. Е. С. Колечицкий. - Москва : МЭИ, 2008. - 248 с

Башарин, С.А, Теоретические основы электротехники : учебник / С. А. Башарин, В. В. Федоров. - 5-е изд., перераб. и доп. - Москва : Академия, 2013. - 384 с. - (Бакалавриат).

Контрольные вопросы для самопроверки

1. От чего зависит периодичность результирующего процесса при сложении двух колебаний одного направления?
2. Какие колебания называются гармоническими?
3. Что такое биения?

Практическое занятие №7

Скин-эффект.

Цель работы:

Изучить явление скин-эффект.

Задание:

1. Решить предыдущее задание для случая сильного скин-эффекта.

Порядок выполнения:

1. Решить предложенные задачи.

Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

17. Цель работы

18. Задание

19. Поэтапное выполнение всех заданий варианта

20. Заключение.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

Основная литература

Зильберман, Г. Е., Электричество и магнетизм : учебное пособие / Г. Е. Зильберман. - 2-е изд. - Долгопрудный : Интеллект, 2008. - 376 с.

Нефедов, Евгений Иванович, Электромагнитные поля и волны: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Инфокоммуникационные технологии и системы связи", квалификации (степени) "бакалавр" и "магистр" / Е. И. Нефедов. - Москва : Академия, 2014. - 368 с. - (Высшее образование: Бакалавриат)

Дополнительная литература

Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб.пособие для вузов / Ю. В. Елисеев, И. П. Белоедова ; ред. Е. С. Колечицкий. - Москва : МЭИ, 2008. - 248 с

Башарин, С.А, Теоретические основы электротехники : учебник / С. А. Башарин, В. В. Федоров. - 5-е изд., перераб. и доп. - Москва : Академия, 2013. - 384 с. - (Бакалавриат).

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Что такое скин-эффект?
2. Как количественно оценивается величина скин-эффекта?
3. В чем идея резонансного метода изучения скин-эффекта?

Практическое занятие №8

Электростатическое поле от различного распределения зарядов.

Цель работы:

Экспериментальное определение картины эквипотенциальных и силовых линий электрического поля.

Задание:

- 1). Рассмотреть поле диполя, получить эквипотенциальные поверхности и линии напряженности.
- 2). Рассмотреть поле заряженной плоскости, получить эквипотенциальные поверхности и линии напряженности.
- 3). Рассмотреть поле заряженного кольца, получить эквипотенциальные поверхности и линии напряженности.
- 4). Рассмотреть поле трех точечных зарядов, получить эквипотенциальные поверхности и линии напряженности.
- 5). Рассмотреть поле заряженной нити, получить эквипотенциальные поверхности и линии напряженности.

.

Порядок выполнения:

1. Решить предложенные задачи.

Форма отчетности:

Отчет сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

21. Цель работы
22. Задание
23. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
24. Заключение.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

Основная литература

Зильберман, Г. Е., Электричество и магнетизм : учебное пособие / Г. Е. Зильберман. - 2-е изд. - Долгопрудный : Интеллект, 2008. - 376 с.

Нефедов, Евгений Иванович, Электромагнитные поля и волны: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки "Инфокоммуникационные технологии и системы связи", квалификации (степени) "бакалавр" и "магистр" / Е. И. Нефедов. - Москва : Академия, 2014. - 368 с. - (Высшее образование: Бакалавриат)

Дополнительная литература

Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие для вузов / Ю. В. Елисеев, И. П. Белодова ; ред. Е. С. Колечицкий. - Москва : МЭИ, 2008. - 248 с

Башарин, С.А, Теоретические основы электротехники : учебник / С. А. Башарин, В. В. Федоров. - 5-е изд., перераб. и доп. - Москва : Академия, 2013. - 384 с. - (Бакалавриат).

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Дайте определение силовых линий электрического поля. Для чего нужны силовые линии?
2. . Сформулируйте и запишите определение потенциала электростатического поля.
3. Сформулируйте и запишите принцип суперпозиции электрических полей.

10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Информационно-коммуникационные технологии (ИКТ) – преподаватель использует для:

- получения информации при подготовке к занятиям,
- создания презентационного сопровождения лекций;
- интерактивного общения;
- ОС Windows 7 Professional;
- Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level ;
- Антивирусное программное обеспечение Kaspersky Security

11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

<i>Вид занятия</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ ПЗ</i>
1	2	3	4
ПЗ	Локальные системы автоматизации	Учебно-исследовательский комплекс по изучению систем автоматике №1 Учебно-исследовательский комплекс по изучению систем автоматике №2	1-8
кр	Локальные системы автоматизации	Учебно-исследовательский комплекс по изучению систем автоматике №1 Учебно-исследовательский комплекс по изучению систем автоматике №2	-
СР	ЧЗЗ	-	-

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ОПК-3	Способность проводить инструментальные измерения, используемые в области инфокоммуникационных технологий и систем связи.	1. Электромагнитное поле	1.1 Электромагнитные свойства среды. Уравнения Максвелла	Вопросы к экзамену 1-17
			1.2 Поток электрического смещения. Дивергенция и ротор векторного поля. Циркуляция магнитного поля.	
			1.3 Электромагнитная индукция. Закон Фарадея. Основные уравнения электромагнитного поля.	
			1.4 Граничные условия. Граничные условия для переменных полей у поверхности идеального проводника. Основные свойства монохроматического поля.	
			1.5 Граничные условия для переменных полей у поверхности идеального проводника. Комплексные проницаемости. Система уравнений монохроматического поля.	
			1.6 Плоские волны в неограниченных средах. Некоторые характеристики электромагнитной волн. Волны в диэлектрике. Волны в проводнике. Поляризация электромагнитной волны.	
		2. Энергия электромагнитного поля. Теория единственности.	2.1 Теорема Пойтинга.	Вопросы к экзамену 1-2
		2.2 Теорема единственности.		
		3. Волны у границы раздела двух сред.	3.1 Отражение и преломление волн на границе идеальных диэлектриков.	Вопросы к экзамену 1-2
		3.2 Граничное условие Леонтовича.		
		4. Излучение и дифракция электромагнитного поля.	4.1 Мощность излучения элементарного электрического вибратора.	Вопросы к экзамену 1-3
			4.2 Инвариантность уравнений поля к элементам электрических и магнитных полей.	
			4.3 Дифракция электромагнитных волн.	

		5. Волны и резонаторы.	5.1 Классификация направляемых волн. Класс ТЕМ (поперечные электромагнитные волны). Классы волн Е и Н.	Вопросы к экзамену 1-6
			5.2 Волны в полом металлическом волноводе. Круглый волновод. Режимы волны.	
			5.3 Классификация направляемых волн. Класс ТЕМ (поперечные электромагнитные волны). Классы волн Е и Н.	
		6. Возбуждение волноводов.	6.1 Запредельные волноводы. Коаксиальные линии. Полосковые линии.	Вопросы к экзамену 1-3
		7. Объемные резонаторы	7.1 Возбуждение резонаторов	Вопросы к зачету 1-1
		8. Замедляющие системы	8.1 Спиральный волновод. Возбуждение волноводов поверхностной волны.	Вопросы к зачету 1-2
		9. Элементы волноводного тракта	9.1 Элементы коаксиальной линии. Волноводный изгиб. Реактивные элементы. Короткозамыкающие поршни.	Вопросы к зачету 1-14
			9.2 Неотражающие устройства. Оконечные нагрузки. Фильтры типов волн. Вращающееся сочленение.	
			9.3 Направленный ответвитель. Многоплечные узлы. Коаксиальный кольцевой мост (гибридное кольцо).	
			9.4 Антенный переключатель. Гиратор. Циркулятор.	
10. Волоконно-оптическое системы передачи	10.1 Длина регенерационного участка	Вопрос к зачету 1		

2. Экзаменационные вопросы

№ п/п	Компетенции		ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ	№ и наименование раздела (
	Код	Определение		
1	2	3	4	5
1	ОПК-3	Способность проводить инструментальные измерения, используемые в области инфокоммуникационных технологий и систем связи.	1. Электромагнитные свойства среды	1. Электромагнитное поле
			2. Уравнения Максвелла.	
			3. Поток электрического смещения.	
			4. Дивергенция и ротор векторного поля	
			5. Циркуляция магнитного поля.	
			6. Электромагнитная индукция.	
			7. Закон Фарадея.	
			8. Основные уравнения электромагнитного поля.	

			<p>9.Граничные условия.</p> <p>10.Граничные условия для переменных полей у поверхности идеального проводника.</p> <p>11.Основные свойства монохроматического поля. Комплексные проницаемости.</p> <p>12. Система уравнений монохроматического поля.</p> <p>13.Плоские волны в неограниченных средах.</p> <p>14.Некоторые характеристики электромагнитной волны.</p> <p>15.Волны в диэлектрике.</p> <p>16.Волны в проводнике.</p> <p>17.Поляризация электромагнитной волны</p>	
			<p>1.Теорема Пойтинга.</p> <p>2. Теорема единственности.</p>	<p>2. Энергия электромагнитного поля. Теория единственности</p>
			<p>1. Отражение и преломление волн на границе идеальных диэлектриков.</p> <p>2 Граничное условие Леонтовича.</p>	<p>3. Волны у границы раздела двух сред.</p>
			<p>1. Мощность излучения элементарного электрического вибратора.</p> <p>2. Инвариантность уравнений поля к элементам электрических и магнитных полей.</p> <p>3. Дифракция электромагнитных волн.</p>	<p>4. Излучение и дифракция электромагнитного поля.</p>
			<p>1. Классификация направляемых волн.</p> <p>2. Класс ТЕМ (поперечные электромагнитные волны).</p> <p>3. Классы волн Е и Н.</p> <p>4. Волны в полном металлическом волноводе.</p> <p>5. Круглый волновод.</p> <p>6. Режимы волны.</p>	<p>5. Волны и резонаторы.</p>
			<p>1. Запредельные волноводы.</p> <p>2. Коаксиальные линии.</p> <p>3. Полосковые линии.</p>	<p>6.Возбуждение волноводов.</p>

Вопросы к зачету

№ п/п	Компетенции		Вопросы к зачету	№ и наименование раздела (
	Код	Определение		
1	2	3	4	5
1	ОПК-3	Способность проводить инструментальные измерения, используемые в области инфокоммуникационных технологий и систем связи.	1. Возбуждение резонаторов	7.Объемные резонаторы
			1. Спиральный волновод.	8.Замедляющие системы
			2. Возбуждение волноводов поверхностной волны.	
			1. Элементы коаксиальной линии.	9.Элементы волноводного тракта
			2. Волноводный изгиб.	
			3. Реактивные элементы.	
			4.Короткозамыкающие поршни.	
			5.Неотражающие устройства.	
			6.Оконечные нагрузки.	
			7.Фильтры типов волн.	
			8.Вращающееся сочленение.	
			9.Направленный ответвитель.	
			10.Многоплечные узлы.	
			11.Коаксиальный кольцевой мост (гибридное кольцо).	
			12.Антенный переключатель.	
13.Гиратор.				
14.Циркулятор.				
1. Длина регенерационного участка	10. Волоконно-оптические системы передачи			

3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p>Знать: (ОПК-3)</p> <ul style="list-style-type: none"> - особенности структуры электромагнитного поля волн, распространяющихся в различных средах, в линиях передачи электромагнитной энергии и объемных резонаторах; <p>Уметь: (ОПК-3)</p> <ul style="list-style-type: none"> - проводить анализ физических процессов, происходящих в различных направляющих системах, устройствах сверхвысоких частот, в однородных и неоднородных средах - понимать сущность 	отлично	<p>Студент должен во время ответа показать знания: электромагнитных телекоммуникационных устройств, основных элементов дисциплины, основных терминов используемые в научно-технической литературе по электромагнитным полям. Студент должен иметь навыки владения: использования универсальных программных продуктов на ПК, понимания материала и способности высказывания мыслей на научно-техническом языке. Студент во время ответа должен продемонстрировать умения: использования навыков электрических экспериментального определения статических характеристик и параметров различных электронных приборов</p>

<p>электромагнитной совместимости;.</p> <p>Владеть: (ОПК-3)</p> <p>-навыками экспериментального определения статических характеристик и параметров различных электронных приборов и их компьютерного исследования по электрическим моделям;</p>	<p>хорошо</p>	<p>Ответ содержит неточности. Дополнительные вопросы требуется, но студент с ними справляется отлично.</p>
	<p>удовлетворительно</p>	<p>Ответил только на один вопрос, либо слабо ответил на оба вопроса. На дополнительные вопросы отвечает неуверенно.</p>
	<p>неудовлетворительно</p>	<p>На оба вопроса студент отвечает неубедительно. На дополнительные вопросы преподавателя также не может ответить.</p>
	<p>Зачтено</p>	<p>Во время защиты практических работ студент ответил на поставленные преподавателем вопросы. Продемонстрировал знание построения логических устройств, владение навыками разработки технического задания.</p>
	<p>Не зачтено</p>	<p>Во время защиты практических работ студент не смог дать ответы на поставленные преподавателем вопросы. Либо отчет имеет ряд замечаний.</p>

4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности

Дисциплина электромагнитные волны и поля направлена на ознакомление с основными элементами и процессами, протекающими при схемах устройств телекоммуникации, и её практическим применением в современных системах телекоммуникаций; на получение теоретических знаний и практических навыков работы со схемами устройств.

Изучение дисциплины интеллектуальные поисковые системы предусматривает:

- лекции,
- практические занятия,
- контрольная работа
- самостоятельную работу студента,
- экзамен,
- зачет.

В ходе освоения раздела 1 «Электромагнитное поле» студенты должны изучить: Электромагнитные свойства среды, Уравнения Максвелла, Поток электрического смещения. Дивергенцию и ротор векторного поля, Циркуляция магнитного поля, Электромагнитную индукцию, Закон Фарадея, Основные уравнения электромагнитного поля.

Граничные условия. Граничные условия для переменных полей у поверхности идеального проводника. Основные свойства монохроматического поля, Граничные условия для переменных полей у поверхности идеального проводника, Комплексные проницаемости. Систему уравнений монохроматического поля, Плоские волны в неограниченных средах, Некоторые характеристики электромагнитной волн, Волны в диэлектрике, Волны в проводнике, Поляризация электромагнитной волны.

В ходе освоения раздела 2 «Энергия электромагнитного поля. Теория единственности» студенты должны изучить: Теорему Пойтинга, Теорему единственности.

В ходе освоения раздела 3 «Волны у границы раздела двух сред» студенты должны изучить: Отражение и преломление волн на границе идеальных диэлектриков, Граничное условие Леонтовича.

В ходе освоения раздела 4 «Излучение и дифракция электромагнитного поля» студенты должны изучить: Мощность излучения элементарного электрического вибратора, Инвариантность уравнений поля к элементам электрических и магнитных полей, Дифракцию электромагнитных волн.

В ходе освоения раздела 5 «Волны и резонаторы» студенты должны изучить: Классификацию направляемых волн, Класс ТЕМ (поперечные электромагнитные волны). Классы волн Е и Н, Волны в полном металлическом волноводе, Круглый волновод, Режимы волны.

В ходе освоения раздела 6 «Возбуждение волноводов» студенты должны изучить: Запредельные волноводы, Коаксиальные линии, Полосковые линии.

В ходе освоения раздела 7 «Объемные резонаторы» студенты должны изучить: Возбуждение резонаторов.

В ходе освоения раздела 8 «Замедляющие системы» студенты должны изучить: Спиральный волновод, Возбуждение волноводов поверхностной волны.

В ходе освоения раздела 9 «Элементы волноводного тракта» студенты должны изучить: Элементы коаксиальной линии, Волноводный изгиб, Реактивные элементы, Короткозамыкающие поршни, Неотражающие устройства, Оконечные нагрузки, Фильтры типов волн, Вращающееся сочленение, Направленный ответвитель, Многоплечные узлы, Коаксиальный кольцевой мост (гибридное кольцо), Антенный переключатель, Гиратор. Циркулятор.

В ходе освоения раздела 10 «Волоконно-оптические системы передачи» студенты должны изучить: Длина регенерационного участка.

В процессе проведения практических работ происходит закрепление знаний, формирование умений и навыков работы с различными схемами транзисторов и усилителей.

При подготовке к экзамену рекомендуется особое внимание уделить следующим вопросам: Инвариантность уравнений поля к элементам электрических и магнитных полей, Волны в полом металлическом волноводе. Круглый волновод. Режимы волны.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературой. Дополнительные сведения по изучаемым темам можно найти в периодической печати и Интернете.

АННОТАЦИЯ

рабочей программы дисциплины

Электромагнитные поля и волны

1. Цель и задачи дисциплины

Целью изучения данной дисциплины является изучение студентами основ построения схем аналоговых и цифровых электронных устройств, осуществляющих усиление, фильтрацию, генерацию и обработку сигналов. В результате изучения дисциплины у студентов должны сформироваться знания, умения и навыки, позволяющие проводить анализ физических процессов и расчет основных электрических характеристик электронных устройств как изучаемых в настоящей дисциплине, так и находящихся за ее рамками.

Задачей изучения дисциплины является получение знания, имеющих не только самостоятельное значение, но и обеспечивающие базовую подготовку для усвоения ряда последующих дисциплин. Данная дисциплина является первой, в которой студенты изучают вопросы практического применения теории электромагнитного поля. Она находится на стыке дисциплин, обеспечивающих базовую и специальную подготовку студентов. Изучая эту дисциплину, студенты впервые знакомятся со структурой электромагнитного поля, возникающего в различных средах и направляющих системах. Приобретенные студентами знания и навыки необходимы как для грамотной эксплуатации телекоммуникационной аппаратуры, так и для обработки широкого класса устройств, связанных с передачей и приемом сигналов.

2. Структура дисциплины

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: Лк – 35 часов, ПЗ – 35 часов, СРС – 83 часов.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 180 часов, 4 зачетных единиц

2.2 Основные разделы дисциплины:

1. Электромагнитное поле
2. Энергия электромагнитного поля. Теория единственности
3. Волны у границы раздела двух сред
4. Излучение и дифракция электромагнитного поля
5. Волны и резонаторы
6. Возбуждение волноводов
7. Объемные резонаторы
8. Замедляющие системы
9. Элементы волноводного тракта
10. Волоконно-оптические системы передачи

3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующей компетенции:

ОПК-3 - Способностью владеть основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации.

4. Вид промежуточной аттестации: экзамен, зачет.

*Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе
на 20__-20__ учебный год*

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

Протокол заседания кафедры № _____ от «__» _____ 20__ г.,
(разработчик)

Заведующий кафедрой _____
(подпись)

(Ф.И.О.)

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ТЕКУЩЕГО
КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ОПК-3	Способность проводить инструментальные измерения, используемые в области инфокоммуникационных технологий и систем связи.	1. Электромагнитное поле	1.1 Электромагнитные свойства среды. Уравнения Максвелла	Отчеты к практическим занятиям. Контрольная работа
			1.2 Поток электрического смещения. Дивергенция и ротор векторного поля. Циркуляция магнитного поля.	Отчеты к практическим занятиям. Контрольная работа
			1.3 Электромагнитная индукция. Закон Фарадея. Основные уравнения электромагнитного поля.	Отчеты к практическим занятиям. Контрольная работа
			1.4 Граничные условия. Граничные условия для переменных полей у поверхности идеального проводника. Основные свойства монохроматического поля.	Отчеты к практическим занятиям. Контрольная работа
			1.5 Граничные условия для переменных полей у поверхности идеального проводника. Комплексные проницаемости. Система уравнений монохроматического поля.	Отчеты к практическим занятиям. Контрольная работа
			1.6 Плоские волны в неограниченных средах. Некоторые характеристики электромагнитной волн. Волны в диэлектрике. Волны в проводнике. Поляризация электромагнитной волны.	Отчеты к практическим занятиям. Контрольная работа
		2. Энергия электромагнитного поля. Теория единственности.	2.1 Теорема Пойтинга.	Отчеты к практическим занятиям. Контрольная работа
			2.2 Теорема единственности.	Отчеты к практическим занятиям. Контрольная работа
		3. Волны у границы раздела двух сред.	3.1 Отражение и преломление волн на границе идеальных диэлектриков.	Отчеты к практическим занятиям. Контрольная работа
			3.2 Граничное условие Леонтовича.	Отчеты к практическим занятиям. Контрольная работа
		4. Излучение и дифракция электромагнитно	4.1 Мощность излучения элементарного электрического вибратора.	Отчеты к практическим занятиям. Контрольная работа

		го поля.	4.2 Инвариантность уравнений поля к элементам электрических и магнитных полей.	Отчеты к практическим занятиям. Контрольная работа
			4.3 Дифракция электромагнитных волн.	Отчеты к практическим занятиям. Контрольная работа
		5. Волны и резонаторы.	5.1 Классификация направляемых волн. Класс TEM (поперечные электромагнитные волны). Классы волн E и H.	Отчеты к практическим занятиям. Контрольная работа
			5.2 Волны в полом металлическом волноводе. Круглый волновод. Режимы волны.	Отчеты к практическим занятиям. Контрольная работа
			5.3 Классификация направляемых волн. Класс TEM (поперечные электромагнитные волны). Классы волн E и H.	Отчеты к практическим занятиям. Контрольная работа
		6. Возбуждение волноводов.	6.1 Запредельные волноводы. Коаксиальные линии. Полосковые линии.	Отчеты к практическим занятиям.
		7. Объемные резонаторы	7.1 Возбуждение резонаторов	Отчеты к практическим занятиям.
		8. Замедляющие системы	8.1 Спиральный волновод. Возбуждение волноводов поверхностной волны.	Отчеты к практическим занятиям.
		9. Элементы волноводного тракта	9.1 Элементы коаксиальной линии. Волноводный изгиб. Реактивные элементы. Короткозамыкающие поршни.	Отчеты к практическим занятиям.
			9.2 Неотражающие устройства. Оконечные нагрузки. Фильтры типов волн. Вращающееся сочленение.	Отчеты к практическим занятиям.
			9.3 Направленный ответвитель. Многоплечные узлы. Коаксиальный кольцевой мост (гибридное кольцо).	Отчеты к практическим занятиям.
			9.4 Антенный переключатель. Гиратор. Циркулятор.	Отчеты к практическим занятиям.
		10. Волоконно-оптическое системы передачи	10.1 Длина регенерационного участка	Отчеты к практическим занятиям.

2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p>Знать: (ОПК-3) - особенности структуры электромагнитного поля волн, распространяющихся в различных средах, в линиях передачи электромагнитной энергии и объемных резонаторах;</p> <p>Уметь: (ОПК-3) - проводить анализ физических процессов, происходящих в различных направляющих системах, устройствах сверхвысоких частот, в однородных и неоднородных средах - понимать сущность электромагнитной совместимости;.</p> <p>Владеть: (ОПК-3) -навыками экспериментального определения статических характеристик и параметров различных электронных приборов и их компьютерного исследования по электрическим моделям;</p>	отлично	Во время защиты контрольной работы студент демонстрирует знание все основных определений и продемонстрировал уверенное умение использовать методы расчета основных показателей усилительных схем, владение достаточным уровнем понимания материала, и способностью самостоятельно высказать мысль на научно-техническом языке.
	хорошо	Во время защиты контрольной работы студент показал не полное понимание материала и навыков владения практическими приемами.
	удовлетворительно	Во время защиты контрольной работы студент показал слабое понимание материала и навыков владения практическими приемами.
	неудовлетворительно	Во время защиты контрольной работы студент не продемонстрировал теоретических знаний по теме работы, либо не показал ни каких практических навыков..
	Зачтено	Во время защиты лабораторных работ и практических работ студент ответил на поставленные преподавателем вопросы. Продемонстрировал знание построения логических устройств, владение навыками разработки технического задания.
	Не зачтено	Во время защиты лабораторных работ и практических работ студент не смог дать ответы на поставленные преподавателем вопросы. Либо отчет имеет ряд замечаний.

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи от «6» марта 2015 г. №174

для набора 2015 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «13» июля 2015г. № 475

для набора 2016 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «06» июня 2016г. № 429

для набора 2017 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «6» марта 2017г. № 125

для набора 2018 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «12» марта 2018г. № 130

Программу составил (и):

Ульянов А.Д. старший преподаватель кафедры УТС
Ф.И.О., должность, ученое звание, (степень)

_____ (подпись)

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры _____ УТС
(сокращенное наименование)
от «28» декабря 2018 г., протокол № 6

Заведующий кафедрой УТС
(разработчик)

_____ (подпись)

Игнатъев И.В.
(Ф.И.О.)

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий выпускающей кафедрой

_____ (подпись)

Игнатъев И.В.
(Ф.И.О.)

Директор библиотеки

_____ (подпись)

Сотник Т.Ф.

Рабочая программа одобрена методической комиссией ЭиА факультета
(сокращенное наименование)
от «28» декабря 2018 г., протокол № 6

Председатель методической комиссии факультета

_____ (подпись)

Ульянов А.Д.
(Ф.И.О.)

СОГЛАСОВАНО:

Начальник

учебно-методического управления _____

Г.П. Нежевец

Регистрационный № _____