

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Кафедра радиоприемных и радиопередающих устройств

“УТВЕРЖДАЮ”

ДЕКАН РЭФ

д.т.н. Хрусталеv В. А.

“ ____ ” _____ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
Электродинамика и распространение радиоволн

Образовательная программа: 11.03.01 Радиотехника, профиль: Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов

Курс: 2 3, семестры : 4 5

Факультет радиотехники и электроники, заочная форма обучения

		Семестр	
№	Вид деятельности	4	5
1	Всего зачетных единиц (кредитов)	0	4
2	Всего часов	0	144
3	Всего занятий в контактной форме, час.	2	21
4	Лекции, час.	2	6
5	Практические занятия, час.	0	0
6	Лабораторные занятия, час.	0	4
7	из них в активной и интерактивной форме, час.	0	0
8	Аттестация, час.	0	2
9	Консультации, час.		9
10	Самостоятельная работа, час.	0	121
11	Виды самостоятельной работы (курсовой проект, курсовая работа, РГЗ, подготовка к контрольной работе)		РГЗ
12	Вид аттестации		Э

Рабочая программа составлена на основании федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению (специальности): 11.03.01 Радиотехника

ФГОС введен в действие приказом №179 от 06.03.2015 г. , дата утверждения: 20.03.2015 г.

Место дисциплины в структуре учебного плана: Блок 1, базовая

Рабочая программа разработана на основе компетентностной модели выпускника по направлению (специальности): 11.03.01 Радиотехника

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры

РПИРПУ, протокол заседания кафедры №6 от 20.06.2017

Утверждена на совете факультета радиотехники и электроники, протокол № 6 от 21.06.2017

Программу разработал:

профессор, д.т.н. Горбачев А. П.

Заведующий кафедрой:

профессор, д.т.н. Киселев А. В.

Ответственный за образовательную программу:

декан Хрусталеv В. А.

1. Внешние требования

Таблица 1.1

Компетенция ФГОС: ОПК.2 способность выявлять естественно-научную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат; в части следующих результатов обучения:
з1. знать основы математического описания электромагнитных полей и радиоволн
у2. уметь рассчитывать параметры электромагнитных полей и радиоволн в свободном пространстве и в направляющих системах

2. Требования НГТУ к результатам освоения дисциплины

Таблица 2.1

Результаты изучения дисциплины по уровням освоения (иметь представление, знать, уметь, владеть)	Формы организации занятий
<i>Электродинамика и распространение радиоволн</i>	
ОПК.2.з1 знать основы математического описания электромагнитных полей и радиоволн	
1. об основных типах электродинамических систем	Лекции; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
2. о структуре электромагнитного поля в основных типах электродинамических систем	Лекции; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
3. о распространении радиоволн в условиях пересечённой местности и при наличии препятствий	Лекции; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
4. интегральные и дифференциальные уравнения электромагнетизма	Лекции; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
5. аналитические и численные методы решения граничных задач	Лекции; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
6. механизм возбуждения электромагнитных полей заданными источниками	Лекции; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
7. теорию излучения электромагнитных волн в свободное пространство	Лекции; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
ОПК.2.у2 уметь рассчитывать параметры электромагнитных полей и радиоволн в свободном пространстве и в направляющих системах	
8. строить математические модели электромагнитных процессов в различных средах	Лекции; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
9. определять характеристики электромагнитных полей	Лекции; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
10. рассчитывать параметры основных типов электродинамических систем	Лекции; Лабораторные работы; Самостоятельная работа
11. изображать структуру электромагнитных полей, токов проводимости и смещения в регулярных направляющих и колебательных системах	Лекции; Лабораторные работы; Самостоятельная работа

3. Содержание и структура учебной дисциплины

Таблица 3.1

Темы лекций	Активные формы, час.	Часы	Ссылки на результаты обучения
Семестр: 4			
Дидактическая единица: Системы уравнений Максвелла и условия на границе раздела сред			
1. Линии передачи с распределенными погонными параметрами. Конструктивная реализация линий передачи. Математические модели линий передачи с распределенными параметрами. Дифференциальные уравнения длинных линий.	0	0,5	1, 10, 8

2. Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной формах. Их физический смысл. Постулаты электромагнетизма для макроэлектродинамики.	0	0,5	1, 11, 4, 5
Дидактическая единица: Свободные электромагнитные волны			
3. Волновые уравнения и их вывод. Порядок решения волновых уравнений. Основные постулаты, используемые при решении волновых уравнений.	0	0,5	2, 4, 8
4. Электромагнитные волны в безграничном пространстве. Их структура, вектор Пойнтинга. Понятие о трассе распространения радиоволн.	0	0,5	3, 7, 9
Семестр: 5			
Дидактическая единица: Направляемые электромагнитные волны			
5. Волновые уравнения и их физический смысл. Теорема единственности решений дифференциальных уравнений электромагнитного поля. Метод частных решений и методы разделения переменных. Продольные и поперечные компоненты электромагнитного поля. Представление поперечных компонент поля через продольные.	0	0,5	2, 4, 8
6. Скалярные и векторные уравнения Гельмгольца. Отыскание частных решений в полых волноводах. Длина и фазовая скорость направляемых волн. Дисперсия волн в полых волноводах. Групповая скорость ансамбля (волнового пакета) электромагнитных волн. Концепция Бриллюэна, лучевая картина распространения волн в волноводах. Критическая частота полых волноводов.	0	0,5	2, 4, 5
7. Электромагнитные волны в прямоугольных и круглых волноводах. Характеристические параметры волноводов. Волны Е- (ТМ) и Н- (ТЕ) типов. Доминантные (основные) и высшие типы волн. Критические частоты. Структура электромагнитного поля доминантных и высших типов волн, картины токов проводимости на стенках волноводов и токов смещения в диэлектрике волновода.	0	2	11, 2, 5, 9
8. Многосвязные направляющие системы. Линии передачи с волнами Т-типа (ТЕМ). Коаксиальный кабель, структура поля внутри кабеля. Доминантная волна и высшие типы волн в коаксиальном кабеле. Волновое сопротивление коаксиального кабеля. Полосковые и микрополосковые линии, структура поля доминантной и высших типов волн. Щелевые и копланарные линии, структура полей доминантной и высших типов волн. Технология реализации планарных линий передачи. Формирование топологии проводящих фрагментов на органических, керамических и кристаллических подложках.	0	0,4	10, 11, 2, 5
9. Объемные резонаторы произвольной формы и граничные условия в них. Структура электромагнитного поля в прямоугольных, цилиндрических и коаксиальных резонаторах, их резонансные частоты. Ввод и вывод энергии типовыми линиями передачи. Потери в резонаторах, их добротность. Квазиоптические направляющие системы и резонаторы. Волоконно-оптические световоды и кабели, технология их реализации и соединения между собой и классическими линиями передачи. Импедансные поверхности и их свойства.	0	0,2	11, 2, 5, 9
Дидактическая единица: Излучение электромагнитных волн и его источники			

11. Эквивалентные виртуальные поверхностные источники. Их взаимосвязь с тангенциальными составляющими электромагнитного поля на границе раздела двух сред с различными диэлектрическими проницаемостями. Элемент Гюйгенса и его электромагнитное излучение. Диаграмма направленности и поляризация излучения элемента Гюйгенса.	0	0,5	4, 6, 7, 9
12. Сторонний ток и поле излучения. Векторные запаздывающие электродинамические потенциалы. Преобразования дифференциальных уравнений электромагнитного поля и анализ их решения. Элементарный электрический диполь Герца. Характеристики излучаемого диполем Герца электромагнитного поля. Элементарный магнитный диполь и принцип перестановочной двойственности.	0	0,5	4, 6, 7, 9
Дидактическая единица: Распространение радиоволн			
13. Распространение радиоволн в свободном пространстве. Представление о радиолиниях. Радиоволны в природных условиях. Влияние поверхности Земли, общий подход, доминантная область (область, существенная для распространения радиоволн).	0	0,5	3, 7, 9
14. Геометрическая оптика и теория дифракции. Постановка задачи дифракции, предельные случаи. Метод Гюйгенса - Кирхгофа. Интегральные характеристики дифракции. Дифракция Фраунгофера на отверстиях, поле дифракции. Дифракция Френеля на отверстиях и её исследование. Зоны Френеля.	0	0,5	3, 7, 9
15. Диапазоны радиоволн и особенности их распространения в каждом из диапазонов. Влияние поверхности Земли и её сферичности. Земные радиоволны, влияние тропосферы и ионосферы. Эффект Н.И.Кабанова и его использование в загоризонтной радиолокации. Рефракция и дифракция радиоволн при их распространении в условиях пересеченной местности и при наличии препятствий. Модели и методы расчета радиотрасс.	0	0,4	3, 7, 9

Таблица 3.2

Темы лабораторных работ	Активные формы, час.	Часы	Ссылки на результаты обучения	Учебная деятельность
Семестр: 5				
Дидактическая единица: Направляемые электромагнитные волны				
10. Исследование характеристик прямоугольных волноводов	0	4	1, 10, 11, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	Студенты: - знакомятся с измерительной аппаратурой и порядком её калибровки и применения; - измеряют рабочие характеристики прямоугольных волноводов; - объясняют причины расхождений прогнозируемых и измеренных результатов; - оформляют отчет по работе и формулируют выводы по её результатам.

4. Самостоятельная работа обучающегося

№	Виды самостоятельной работы	Ссылки на результаты обучения	Часы на выполнение	Часы на консультации
Семестр: 5				
1	РГЗ	11, 2, 4, 6, 9	36	5
Студенты прорабатывают вопросы, связанные с оцениванием характеристик электромагнитных полей в заданной волноводно-диэлектрической структуре.: Электродинамика и распространение радиоволн : методические указания к лабораторным работам по дисциплине "Электродинамика и распространение радиоволн" для всех форм обучения 3 курса факультета "Радиотехника и электроника" / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: А. П. Горбачев, М. А. Степанов]. - Новосибирск, 2010. - 39, [2] с. : ил.. - Режим доступа: http://www.library.nstu.ru/fulltext/metodics/2010/3823.pdf				
2	Подготовка к занятиям	1, 10, 11, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	58	2
Студенты изучают лекционный материал, а также рекомендованную учебную литературу, руководствуясь соответствующими методическими рекомендациями и указаниями по выполнению лабораторных работ.: Бухтияров Д. А. Моделирование коаксиальных и волноводных линий передачи : учебно-методическое пособие / Д. А. Бухтияров, А. П. Горбачев, Н. В. Тарасенко ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2017. - 57, [2] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000234962				
3	Подготовка к аттестации	1, 10, 11, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	27	2
Студенты готовятся к итоговой аттестации за семестр по лекциям, учебникам, учебным пособиям и методическим указаниям.: Горбачев А. П. Электромагнитные волны в прямоугольных и круглых волноводах : учебное пособие / А. П. Горбачев, Ю. О. Филимонова ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2012. - 210, [1] с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000171184				

5. Технология обучения

Для организации и контроля самостоятельной работы обучающихся, а также проведения консультаций применяются информационно-коммуникационные технологии (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Деятельность	Информационно-коммуникационные технологии
Информирование	Социальные сети: vk.com/radiowaves410
Консультирование	e-mail: gorbachev@corp.nstu.ru
Контроль	e-mail: gorbachev@corp.nstu.ru
Размещение учебных материалов	Портал НГТУ

6. Правила аттестации обучающихся по учебной дисциплине

Для аттестации обучающихся по дисциплине используется балльно-рейтинговая система (БРС), позволяющая выставять оценки по традиционной шкале и 15-уровневой ECTS. Краткая информация о БРС приведена в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Оцениваемые виды деятельности обучающихся	Мин. балл	Максимальный балл
Семестр: 5		

Лабораторная:	16	32
Контролирующие материалы (список вопросов) приводятся в "Электродинамика и распространение радиоволн : методические указания к лабораторным работам по дисциплине "Электродинамика и распространение радиоволн" для всех форм обучения 3 курса факультета "Радиотехника и электроника" / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: А. П. Горбачев, М. А. Степанов]. - Новосибирск, 2010. - 39, [2] с. : ил. - Режим доступа: http://www.library.nstu.ru/fulltext/metodics/2010/3823.pdf "		
РГЗ:	18	28
Контролирующие материалы приводятся в "Бухтияров Д. А. Моделирование коаксиальных и волноводных линий передачи : учебно-методическое пособие / Д. А. Бухтияров, А. П. Горбачев, Н. В. Тарасенко ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2017. - 57, [2] с. : ил. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000234962 "		
Экзамен:	16	40
Контролирующие материалы (список вопросов) приводятся в "Горбачев А. П. Электромагнитные волны в прямоугольных и круглых волноводах : учебное пособие / А. П. Горбачев, Ю. О. Филимонова ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2012. - 210, [1] с. : ил., табл. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000171184 "		

В таблице 6.2 представлено соответствие форм контроля заявляемым требованиям к результатам освоения дисциплины.

Таблица 6.2

Коды компетенций ФГОС	Результаты обучения	Формы контроля		
		Защита ЛР	Защита РГЗ	Экзамен
ОПК.2	з1. знать основы математического описания электромагнитных полей и радиоволн	+	+	+
	у2. уметь рассчитывать параметры электромагнитных полей и радиоволн в свободном пространстве и в направляющих системах	+	+	+

Фонд оценочных средств по дисциплине представлен в приложении № 1 к рабочей программе.

7. Литература

Основная литература

1. Петров Б. М. Электродинамика и распространение радиоволн : учебник для вузов по направлению "Радиотехника" и специальностям "Радиотехника", "Радиофизика и электроника", "Бытовая радиоэлектронная аппаратура" / Б. М. Петров. - М., 2007. - 558 с. : ил.
2. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн : [учебник для вузов по специальности 2011 (Радиовещание, радиосвязь, телевидение)] / Г. А. Ерохин [и др.] ; под ред. Г. А. Ерохина. - М., 2007. - 491 с. : ил. - На тит. л. и обл. авт.: О. В. Чернов. - В вып. дан. : О. В. Чернышев.

Дополнительная литература

1. Морозов А. В. Электродинамика и распространение радиоволн : [учебник для высших военных учебных заведений по специальностям направления "Радиотехника"] / А. В. Морозов, А. Н. Нырцов, Н. П. Шмаков. - М., 2007. - 408 с. : ил.
2. Нефедов Е. И. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн : [учебник для образовательных учреждений среднего профессионального образования] / Е. И. Нефёдов. - М., 2006. - 315, [1] с. : ил.
3. Электродинамика и распространение радиоволн : [учебное пособие для вузов] / В. А. Неганов [и др.] ; под ред. В. А. Неганова и С. Б. Раевского. - М., 2005. - 647 с. : ил.

Интернет-ресурсы

1. ЭБС НГТУ : <http://elibrary.nstu.ru/>
2. ЭБС «Издательство Лань» : <https://e.lanbook.com/>
3. ЭБС IPRbooks : <http://www.iprbookshop.ru/>
4. ЭБС "Znaniy.com" : <http://znaniy.com/>

5. :

8. Методическое и программное обеспечение

8.1 Методическое обеспечение

1. Горбачев А. П. Электромагнитные волны в прямоугольных и круглых волноводах : учебное пособие / А. П. Горбачев, Ю. О. Филимонова ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2012. - 210, [1] с. : ил., табл.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000171184
2. Электродинамика и распространение радиоволн : методические указания к лабораторным работам по дисциплине "Электродинамика и распространение радиоволн" для всех форм обучения 3 курса факультета "Радиотехника и электроника" / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост.: А. П. Горбачев, М. А. Степанов]. - Новосибирск, 2010. - 39, [2] с. : ил.. - Режим доступа: <http://www.library.nstu.ru/fulltext/metodics/2010/3823.pdf>
3. Бухтияров Д. А. Моделирование коаксиальных и волноводных линий передачи : учебно-методическое пособие / Д. А. Бухтияров, А. П. Горбачев, Н. В. Тарасенко ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2017. - 57, [2] с. : ил.. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000234962

8.2 Специализированное программное обеспечение

- 1 Windows
- 2 Office

9. Материально-техническое обеспечение

Лабораторный стенд

№	Наименование	Назначение
1	АНТЕННА П6-23 измерит.	Используется для выполнения лабораторной работы № 3.
2	АТТЕНЮАТОР ДЗ-33А	Используется для выполнения лабораторной работы № 4.
3	ГЕНЕРАТОР Г4-109	Используется для выполнения лабораторной работы № 2.
4	Генератор Г4-109	Используется для выполнения лабораторной работы № 4.
5	Генератор Г4-76А	Используется для выполнения лабораторной работы № 3.
6	Генератор Г4-76А	Используется для выполнения лабораторной работы № 1.
7	ЛИНИЯ Р1-28	Используется для выполнения лабораторной работы № 2.
8	ИЗМЕРИТЕЛЬ КСВН	Используется для выполнения лабораторной работы № 1.
9	ЛИНИЯ Р1-34	Используется для выполнения лабораторной работы № 4.
10	ИЗМЕРИТЕЛЬ КСВР2-54	Используется для выполнения лабораторной работы № 3.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Кафедра радиоприемных и радиопередающих устройств

“УТВЕРЖДАЮ”
ДЕКАН РЭФ
д.т.н., профессор В.А. Хрусталеv
“ ” _____ _____ г.

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Электродинамика и распространение радиоволн

Образовательная программа: 11.03.01 Радиотехника, профиль: Радиотехнические средства
передачи, приема и обработки сигналов

1. Обобщенная структура фонда оценочных средств учебной дисциплины

Обобщенная структура фонда оценочных средств по дисциплине Электродинамика и распространение радиоволн приведена в Таблице.

Таблица

Формируемые компетенции	Показатели сформированности компетенций (знания, умения, навыки)	Темы	Этапы оценки компетенций	
			Мероприятия текущего контроля (курсовой проект, РГЗ(Р) и др.)	Промежуточная аттестация (экзамен, зачет)
ОПК.2 способность выявлять естественно-научную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат	31. знать основы математического описания электромагнитных полей и радиоволн	Волновые уравнения и их физический смысл. Теорема единственности решений дифференциальных уравнений электромагнитного поля. Метод частных решений и методы разделения переменных. Продольные и поперечные компоненты электромагнитного поля. Представление поперечных компонент поля через продольные. Геометрическая оптика и теория дифракции. Постановка задачи дифракции, предельные случаи. Метод Гюйгенса - Кирхгофа. Интегральные характеристики дифракции. Дифракция Фраунгофера на отверстиях, поле дифракции. Дифракция Френеля на отверстиях и её исследование. Зоны Френеля. Диапазоны радиоволн и особенности их распространения в каждом из диапазонов. Влияние поверхности Земли и её сферичности. Земные радиоволны, влияние тропосферы и ионосферы. Эффект Н.И.Кабанова и его использование в загоризонтной радиолокации. Рефракция и дифракция радиоволн при их распространении в условиях пересеченной местности и при наличии препятствий. Модели и методы расчета радиотрасс. Исследование характеристик прямоугольных волноводов. Линии передачи с распределенными по длине погонными параметрами. Конструктивная реализация линий передачи. Математические модели линий передачи с распределенными параметрами. Дифференциальные уравнения длинных линий.	Отчет по лабораторной работе. РГЗ.	Экзамен, вопросы 1-50.

		Многосвязные направляющие системы. Линии передачи с волнами Т-типа (ТЕМ). Коаксиальный кабель, структура поля внутри кабеля. Доминантная волна и высшие типы волн в коаксиальном кабеле. Волновое сопротивление коаксиального кабеля. Полосковые и микрополосковые линии, структура поля доминантной и высших типов волн. Щелевые и копланарные линии, структура полей доминантной и высших типов волн. Технология реализации планарных линий передачи. Формирование топологии проводящих фрагментов на органических, керамических и кристаллических подложках. Объемные резонаторы произвольной формы и граничные условия в них. Структура электромагнитного поля в прямоугольных, цилиндрических и коаксиальных резонаторах, их резонансные частоты. Ввод и вывод энергии типовыми линиями передачи. Потери в резонаторах, их добротность. Квазиоптические направляющие системы и резонаторы. Волоконно-оптические световоды и кабели, технология их реализации и соединения между собой и классическими линиями передачи. Импедансные поверхности и их свойства. Распространение радиоволн в свободном пространстве. Представление о радиоперелиниях. Радиоволны в природных условиях. Влияние поверхности Земли, общий подход, доминантная область (область, существенная для распространения радиоволн). Скалярные и векторные уравнения Гельмгольца. Отыскание частных решений в полых волноводах. Длина и фазовая скорость направляемых волн. Дисперсия волн в полых волноводах. Групповая скорость ансамбля (волнового пакета) электромагнитных волн. Концепция Бриллюэна, лучевая картина распространения волн в волноводах. Критическая частота полых волноводов. Сторонний ток и поле излучения. Векторные		
--	--	--	--	--

		запаздывающие электродинамические потенциалы. Преобразования дифференциальных уравнений электромагнитного поля и анализ их решения. Элементарный электрический диполь Герца. Характеристики излучаемого диполем Герца электромагнитного поля. Элементарный магнитный диполь и принцип перестановочной двойственности. Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной формах. Их физический смысл. Постулаты электромагнетизма для макроэлектродинамики. Эквивалентные виртуальные поверхностные источники. Их взаимосвязь с тангенциальными составляющими электромагнитного поля на границе раздела двух сред с различными диэлектрическими проницаемостями. Элемент Гюйгенса и его электромагнитное излучение. Диаграмма направленности и поляризация излучения элемента Гюйгенса. Электромагнитные волны в прямоугольных и круглых волноводах. Характеристические параметры волноводов. Волны Е- (ТМ) и Н- (ТЕ) типов. Доминантные (основные) и высшие типы волн. Критические частоты. Структура электромагнитного поля доминантных и высших типов волн, картины токов проводимости на стенках волноводов и токов смещения в диэлектрике волновода.		
ОПК.2	у2. уметь рассчитывать параметры электромагнитных полей и радиоволн в свободном пространстве и в направляющих системах	Волновые уравнения и их физический смысл. Теорема единственности решений дифференциальных уравнений электромагнитного поля. Метод частных решений и методы разделения переменных. Продольные и поперечные компоненты электромагнитного поля. Представление поперечных компонент поля через продольные. Геометрическая оптика и теория дифракции. Постановка задачи дифракции, предельные случаи. Метод Гюйгенса - Кирхгофа. Интегральные	Отчет по лабораторной работе. РГЗ.	Экзамен, вопросы 1-50.

		характеристики дифракции. Дифракция Фраунгофера на отверстии, поле дифракции. Дифракция Френеля на отверстии и её исследование. Зоны Френеля. Диапазоны радиоволн и особенности их распространения в каждом из диапазонов. Влияние поверхности Земли и её сферичности. Земные радиоволны, влияние тропосферы и ионосферы. Эффект Н.И.Кабанова и его использование в загоризонтной радиолокации. Рефракция и дифракция радиоволн при их распространении в условиях пересеченной местности и при наличии препятствий. Модели и методы расчета радиотрасс. Исследование характеристик прямоугольных волноводов Многосвязные направляющие системы. Линии передачи с волнами Т-типа (ТЕМ). Коаксиальный кабель, структура поля внутри кабеля. Доминантная волна и высшие типы волн в коаксиальном кабеле. Волновое сопротивление коаксиального кабеля. Полосковые и микрополосковые линии, структура поля доминантной и высших типов волн. Щелевые и копланарные линии, структура полей доминантной и высших типов волн. Технология реализации планарных линий передачи. Фрмирование топологии проводящих фрагментов на органических, керамических и кристаллических подложках. Объемные резонаторы произвольной формы и граничные условия в них. Структура электромагнитного поля в прямоугольных, цилиндрических и коаксиальных резонаторах, их резонансные частоты. Ввод и вывод энергии типовыми линиями передачи. Потери в резонаторах, их добротность. Квазиоптические направляющие системы и резонаторы. Волоконно- оптические световоды и кабели, технология их реализации и соединения между собой и классическими линиями передачи. Импедансные поверхности и их свойства. Распространение радиоволн в свободном		
--	--	---	--	--

		пространстве. Представление о радиолиниях. Радиоволны в природных условиях. Влияние поверхности Земли, общий подход, доминантная область (область, существенная для распространения радиоволн). Сторонний ток и поле излучения. Векторные запаздывающие электродинамические потенциалы. Преобразования дифференциальных уравнений электромагнитного поля и анализ их решения. Элементарный электрический диполь Герца. Характеристики излучаемого диполем Герца электромагнитного поля. Элементарный магнитный диполь и принцип перестановочной двойственности. Эквивалентные виртуальные поверхностные источники. Их взаимосвязь с тангенциальными составляющими электромагнитного поля на границе раздела двух сред с различными диэлектрическими проницаемостями. Элемент Гюйгенса и его электромагнитное излучение. Диаграмма направленности и поляризация излучения элемента Гюйгенса. Электромагнитные волны в прямоугольных и круглых волноводах. Характеристические параметры волноводов. Волны Е- (ТМ) и Н- (ТЕ) типов. Доминантные (основные) и высшие типы волн. Критические частоты. Структура электромагнитного поля доминантных и высших типов волн, картины токов проводимости на стенках волноводов и токов смещения в диэлектрике волновода.		
--	--	--	--	--

2. Методика оценки этапов формирования компетенций в рамках дисциплины.

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в 5 семестре - в форме экзамена, который направлен на оценку сформированности компетенций ОПК.2.

Экзамен проводится в устной форме по билетам согласно паспорту экзамена.

Кроме того, сформированность компетенции проверяется при проведении мероприятий текущего контроля, указанных в таблице раздела 1.

В 5 семестре обязательным этапом текущей аттестации является расчетно-графическое задание (РГЗ). Требования к выполнению РГЗ, состав и правила оценки сформулированы в паспорте РГЗ.

Общие правила выставления оценки по дисциплине определяются балльно-рейтинговой системой, приведенной в рабочей программе учебной дисциплины.

На основании приведенных далее критериев можно сделать общий вывод о сформированности компетенции ОПК.2, за которые отвечает дисциплина, на разных уровнях.

Общая характеристика уровней освоения компетенций.

Ниже порогового. Уровень выполнения работ не отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, пробелы носят существенный характер, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы не достаточно, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий не выполнены или выполнены с существенными ошибками.

Пороговый. Уровень выполнения работ отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий выполнено, некоторые виды заданий выполнены с ошибками.

Базовый. Уровень выполнения работ отвечает всем основным требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, некоторые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы недостаточно, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения ни одного из них не оценено минимальным числом баллов, некоторые из выполненных заданий содержат несущественные ошибки.

Продвинутый. Уровень выполнения работ отвечает всем требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному.

Паспорт экзамена

по дисциплине «Электродинамика и распространение радиоволн», 5 семестр

1. Методика оценки

Экзамен проводится в устной форме, по билетам. Билет формируется из двух вопросов (список вопросов приведен ниже). В ходе экзамена преподаватель вправе задавать студенту дополнительные вопросы из общего перечня (п. 4).

Форма экзаменационного билета

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Факультет РЭФ

Билет № 3

к экзамену по дисциплине «Электродинамика и распространение радиоволн»

1. Волновые уравнения электромагнитного поля. Их интерпретация и физический смысл.
2. Дифракция Фраунгофера на отверстиях. Метод Гюйгенса – Кирхгофа.

Утверждаю: зав. кафедрой РПиРПУ _____ д.т.н., проф. А.В. Киселев
(подпись)

(дата)

2. Критерии оценки

- Ответ на экзаменационный билет считается **неудовлетворительным**, если студент при ответе на вопросы не дает определений основных понятий, не способен показать причинно-следственные связи явлений, не в состоянии интерпретировать результаты математической записи, описывающей анализируемое явление природы в области электродинамики, оценка составляет от 0 до 19 баллов.
- Ответ на экзаменационный билет засчитывается на **пороговом** уровне, если студент при ответе на вопросы дает определение основных понятий с неточностями, может показать причинно-следственные связи явлений с пробелами, нечетко интерпретирует результаты математической записи, оценка составляет от 20 до 27 баллов.
- Ответ на экзаменационный билет засчитывается на **базовом** уровне, если студент при ответе на вопросы формулирует основные понятия, законы, дает характеристику процессов, явлений, проводит анализ причин, условий, может представить

качественные характеристики процессов, но допускает ошибки при математической записи результатов, оценка составляет от 28 до 34 баллов.

- Ответ на экзаменационный билет засчитывается на **продвинутом** уровне, если студент при ответе на вопросы проводит сравнительный анализ подходов, проводит комплексный анализ, выявляет проблемы, предлагает механизмы решения, способен представить количественные характеристики определенных процессов, приводит конкретные примеры из практики, не допускает ошибок или допускает мелкие погрешности при математической записи, оценка составляет от 35 до 40 баллов.

3. Шкала оценки

Экзамен считается сданным, если сумма баллов по всем заданиям билета составляет не менее 20 баллов (из 40 возможных).

В общей оценке по дисциплине экзаменационные баллы учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Вопросы к экзамену по дисциплине «Электродинамика и распространение радиоволн»

1. Линии передачи с распределёнными параметрами. Падающие и отражённые волны. «Телеграфные» уравнения.
2. Входное сопротивление линии передачи. Круговая диаграмма Смита.
3. Стоячие волны в линии передачи. Экспериментальное определение длины волны.
4. Трансформация комплексных сопротивлений отрезками линий передачи.
5. Многосвязные направляющие системы. Вывод «телеграфных» уравнений из уравнений Максвелла.
6. Электромагнитные поля в продольно однородных и изотропных системах.
7. Волновые уравнения электромагнитного поля. Их интерпретация и физический смысл.
8. Теорема единственности решений уравнений электромагнитного поля. Метод частных решений.
9. Отыскание частных решений для поля в полых волноводах. Скалярные уравнения Гельмгольца («мембранные» уравнения).
10. Граничные условия для продольных составляющих поля в волноводе. Пример использования.
11. Вещественный характер собственных чисел уравнений Гельмгольца при нулевых граничных условиях.
12. Граничные условия для E- и H-составляющих электромагнитного поля на контуре поперечного сечения регулярного полого волновода.
13. Доказательство невозможности существования ТЕМ волны в полом волноводе.
14. Фазовая скорость и длина волны направляемых волн. Геометрическая интерпретация отсечки волны.
15. Лучевая картина распространения основной волны. Концепция Бриллюэна.
16. Векторные уравнения Гельмгольца в терминах комплексных амплитуд.
17. Решение скалярного уравнения Гельмгольца («мембранного» уравнения) для волн H-типа в прямоугольном волноводе.
18. Решение скалярного уравнения Гельмгольца («мембранного» уравнения) для волн E-типа в прямоугольном волноводе.
19. Нахождение поперечных составляющих волн в произвольных регулярных полых волноводах.
20. Структура доминантной волны прямоугольного волновода. Ввод – вывод энергии

коаксиальным кабелем.

21. Решение скалярного уравнения Гельмгольца («мембранного» уравнения) в полярной системе координат.
22. Конкретизация постоянных интегрирования при решении дифференциальных уравнений электромагнитного поля в круглом волноводе.
23. Структура доминантной волны круглого волновода. Ввод – вывод энергии коаксиальным кабелем.
24. Структура волн TM_{01} (E_{01}) и TM_{11} (E_{11}) в круглом волноводе. Их возбуждение и практическое использование.
25. Фазовая скорость волн в волноводах. Дисперсия, критическая частота волновода.
26. Групповая скорость волн в волноводах. Пример расчета для амплитудно-модулированных сигналов.
27. Технология изготовления волноводов, их соединение между собой. Дроссельно-фланцевое соединение и принцип его работы.
28. Неоднородности в волноводах и высшие типы волн. Принцип декомпозиции. Гофрированные волноводы.
29. Диэлектрические волноводы и волоконно-оптические кабели. Конструкции и технология изготовления, их соединение.
30. Составляющие электромагнитного поля в коаксиальном кабеле. Структура поля.
31. Понятие волнового сопротивления коаксиального кабеля, его расчёт.
32. Высшие типы волн в коаксиальных кабелях, их оценивание. Область рабочих частот коаксиального кабеля.
33. Прямоугольные резонаторы. Их резонансные частоты. Пример использования.
34. Цилиндрические резонаторы. Их резонансные частоты. Пример использования.
35. Коаксиальные резонаторы. Их резонансные частоты. Пример использования.
36. Квазиоптические направляющие системы и резонаторы.
37. Периодические системы и импедансные поверхности.
38. Сторонний ток и поле излучения. Векторные запаздывающие электродинамические потенциалы и их связь с компонентами электромагнитного поля.
39. Электромагнитное излучение диполя Герца. Анализ решений, диаграмма направленности, сопротивление излучения.
40. Электромагнитное излучение элементарного магнитного диполя. Принцип перестановочной двойственности (взаимозаменяемости полей). Анализ решений, диаграмма направленности, сопротивление излучения.
41. Эквивалентные поверхностные источники и принцип Гюйгенса. Элемент Гюйгенса.
42. Полосковые и микрополосковые линии, конструкции, технология реализации. Ввод и вывод энергии.
43. Щелевые и копланарные линии, конструкции, технология реализации. Ввод и вывод энергии.
44. Распространение радиоволн в свободном пространстве. Радиолинии.
45. Радиочастотный ресурс и радиодиапазоны. Их особенности.
46. Геометрическая оптика и теория дифракции при анализе распространения радиоволн. Учёт сферичности Земли.
47. Дифракция Фраунгофера на отверстиях. Метод Гюйгенса – Кирхгофа.
48. Дифракция Френеля на отверстиях. Зоны Френеля.
49. Рефракция радиоволн. Эффект Н.И.Кабанова и его использование в загоризонтной радиолокации.
50. Распространение радиоволн в горах, лесах, городах, над морем и сушей. Влияние поверхности Земли и водной глади Океана.

Паспорт расчетно-графического задания (работы)

по дисциплине «Электродинамика и распространение радиоволн», 5 семестр

1. Методика оценки

В рамках расчетно-графического задания по дисциплине студенты должны рассчитать структуру электромагнитного поля заданного типа волны в прямоугольном или круглом волноводах в соответствии с исходными данными.

При выполнении расчетно-графического задания (работы) студенты должны провести анализ заданного типа волны, выбрать и обосновать временные функции, а затем изобразить структуру силовых линий поля в трех проекциях или средствами компьютерной графики. При этом красными линиями изображаются силовые линии электрического поля, зелеными – магнитного поля, а синими – плотность тока смещения в волноводе.

Обязательные структурные части РГЗ:

- анализ заданного типа волны;
- выбор и обоснование временных функций;
- уравнения силовых линий поля заданной волны.

Оцениваемые позиции:

- тщательность анализа заданного типа волны;
- обоснованность выбора временных функций;
- правильность уравнений силовых линий поля.

2. Критерии оценки

- Работа считается **не выполненной**, если выполнены не все части РГЗ, отсутствует анализ типа волны, временные функции не обоснованы, уравнения силовых линий записаны с ошибками, графики выполнены небрежно и содержат существенные пробелы и/или неточности, оценка составляет от 5 до 17 баллов.
- Работа считается выполненной **на пороговом** уровне, если части РГЗ выполнены формально: анализ типа волны выполнен с пробелами, временные функции недостаточно обоснованы, уравнения силовых линий и построенные графики содержат неточности, оценка составляет от 18 до 21 баллов.
- Работа считается выполненной **на базовом** уровне, если анализ типа волны выполнен в полном объеме, временные функции обоснованы, уравнения силовых линий записаны в основном правильно, графики построены с некоторыми неточностями, оценка составляет от 22 до 25 баллов.
- Работа считается выполненной **на продвинутом** уровне, если анализ заданного типа волны выполнен в полном объеме, признаки и параметры временных функций обоснованы, уравнения силовых линий записаны правильно, графики представлены в полном объеме без ошибок или с мелкими погрешностями, оценка составляет от 26 до 28 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за РГЗ(Р) учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Примерный перечень тем РГЗ(Р)

Варианты заданий формируются по последней цифре шифра студента, варьируются от семестра к семестру (во избежание переписывания с потока на поток) и выдаются студенту под роспись. Ниже приводится типовое задание и образец выполнения РГЗ.

Расчетно-графическое задание
по дисциплине «Электродинамика и распространение
радиоволн»
«Исследование волны ТМ₂₂ в прямоугольном волноводе»

Факультет: РЭФ
Группа: РТ5-41
Студент:
Преподаватель: Горбачев А.П.

Предварительное задание

исходные данные

$a, \text{мм}$	$b, \text{мм}$	$\rho_0, \text{Ом}$	ε_r	Высший тип
27	13	75	1.6	TM_{22}

1. Рассчитать штыревой ввод энергии для основной волны для $\varepsilon_a = \varepsilon_0$ и $\varepsilon_a = \varepsilon_r \varepsilon_0$

$$l_1 = \frac{\lambda_B}{4}, h = \frac{\lambda}{4}$$

$$1.1) \varepsilon_a = \varepsilon_0, \mu_r = 1$$

Скорость света в среде без диэлектрика

$$V_L = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Основная волна, значит $m=1, n=0$, тогда

$$k_{10}^{\text{кр}} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} = \frac{\pi}{a} = \frac{\pi}{27 \cdot 10^{-3}} \approx 116.355 \frac{\text{рад}}{\text{м}}$$

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{2\pi}{k_{10}^{\text{кр}}} \approx 0.054 \text{ м}$$

$$f_{\text{кр}} = \frac{V_L}{\lambda_{\text{кр}}} \approx 5.56 \text{ ГГц}$$

Найдем рабочую частоту и соответствующую ей длину волны

$$f_p = 1.5 f_{\text{кр}} = 1.5 \cdot 5.56 \cdot 10^9 = 8.34 \text{ ГГц}$$

$$\lambda = \frac{c}{f_p} = \frac{3 \cdot 10^8}{8.34 \cdot 10^9} \approx 0.036 \text{ м}$$

Длина волны в волноводе, волновое сопротивление и число k :

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}} \approx 0.0484 \text{ м}$$
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_r} = \frac{2\pi}{0.036} \approx 174.4 \frac{\text{рад}}{\text{м}}$$

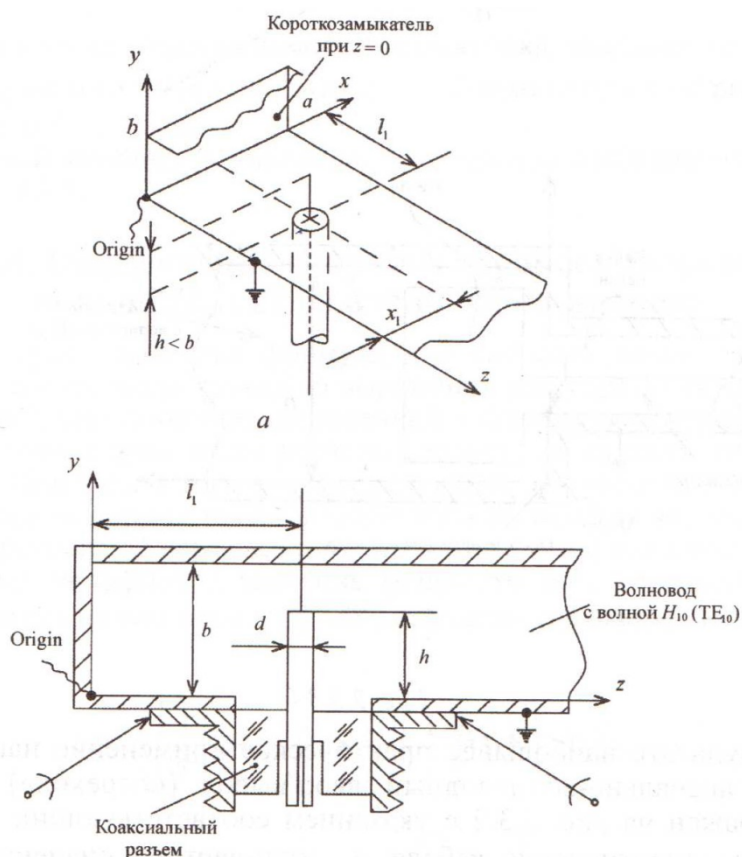
$$\rho_H = \frac{\sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}} \approx 505.72 \text{ Ом}$$

Расчет искомых параметров l_1, x_1 и h

$$l_1 = \frac{\lambda_B}{4} \approx 0.0121 \text{ м}$$

$$h = \frac{\lambda}{4} \approx 0.009 \text{ м}$$

$$x_1 = \frac{a}{\pi} \arcsin \left[\frac{2\pi}{\lambda \cdot (1 - \cos(kh))} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 ab}{2\rho_H}} \right] \approx 9.427 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$



геометрические параметры прямоугольного волновода с штыревым вводом/выводом энергии

$$1.2) \epsilon_a = \epsilon_r \epsilon_0, \mu_r = 1, \epsilon_r = 1.6$$

Расчеты аналогичные

$$V_L = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0}} \approx 2.37 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$k_{10}^{\text{кр}} \approx 116.355 \frac{\text{рад}}{\text{м}}$$

$$\lambda_{\text{кр}} \approx 0.054 \text{ м}$$

$$f_{\text{кр}} = \frac{V_L}{\lambda_{\text{кр}}} \approx 4.389 \text{ ГГц}$$

$$f_p = 1.5 f_{\text{кр}} \approx 6.58 \text{ ГГц}$$

$$\lambda = \frac{c}{f_p} \approx 0.0456 \text{ м}$$

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}} \approx 0.085 \text{ м}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r} \approx 174.4 \frac{\text{рад}}{\text{м}}$$

$$\rho_H = \frac{\sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}} \approx 555.07 \text{ Ом}$$

Расчет искомых параметров l_1 , x_1 и h

$$l_1 = \frac{\lambda_B}{4} \approx 0.0212 \text{ м}$$

$$h = \frac{\lambda}{4} \approx 0.0114 \text{ м}$$

$$x_1 = \frac{a}{\pi} \arcsin \left[\frac{2\pi}{\lambda \cdot (1 - \cos(kh))} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0 ab}{2\rho_H}} \right] \approx 4.285 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

2. Расчет и построение дисперсионных характеристик основной и высшей волны для $\varepsilon_a = \varepsilon_0$ и $\varepsilon_a = \varepsilon_r \varepsilon_0$ в диапазоне частот $f_{кр} < f < 2f_{кр}$

Фазовые скорости волн для высшей волны TM_{22}

$m=2, n=2$

$$k_{22}^{кр} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \approx 536.43 \text{ рад/м}$$

Для среды без диэлектрика:

$$V_{L0} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$f_{кр0}^{22} = \frac{k_{22}^{кр} \cdot V_{L0}}{2\pi} \approx 2.56 \cdot 10^{10} \text{ Гц}$$

$$V_{\phi 0}^{22}(f) = \frac{V_{L0}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр0}^{22}}{f}\right)^2}}$$

Для среды с диэлектриком:

$$V_L = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_0}} \approx 2.37 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$f_{кр}^{22} = \frac{k_{22}^{кр} \cdot V_L}{2\pi} \approx 2.0234 \cdot 10^{10} \text{ Гц}$$

$$V_{\phi}^{22}(f) = \frac{V_L}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{кр}^{22}}{f}\right)^2}}$$

Фазовые скорости волн для основной волны TM_{10}

$m=1, n=0$

$$k_{10}^{\text{кр}} = \frac{\pi}{a} \approx 116.355 \frac{\text{рад}}{\text{м}}$$

Для среды без диэлектрика:

$$V_{L0} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$f_{\text{кр}0}^{10} = \frac{k_{10}^{\text{кр}} \cdot V_{L0}}{2\pi} \approx 5.552 \text{ ГГц}$$

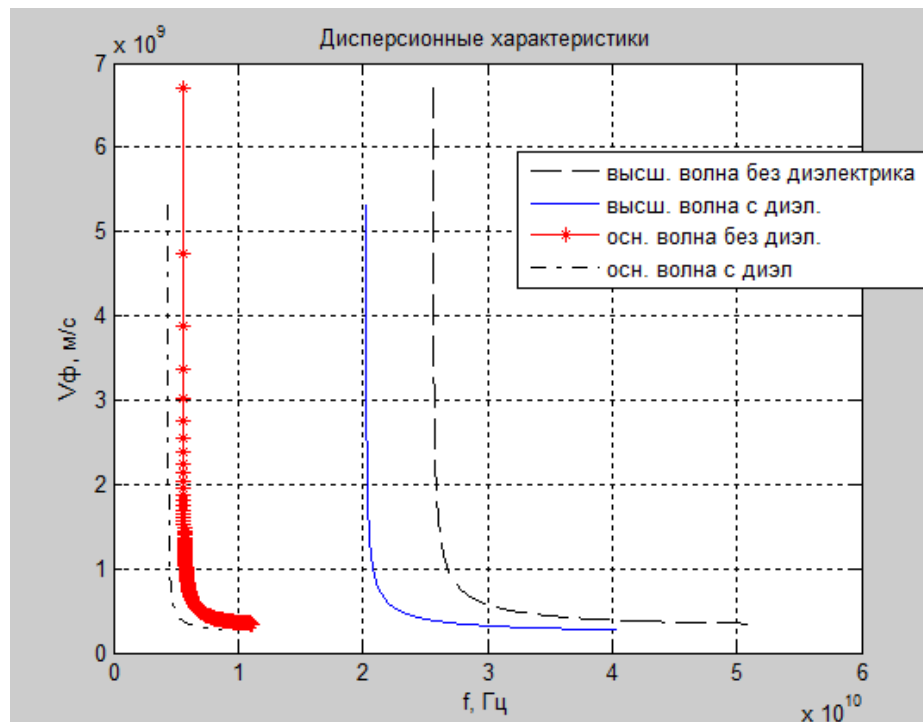
$$V_{\phi 0}^{10}(f) = \frac{V_{L0}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{\text{кр}0}^{10}}{f}\right)^2}}$$

Для среды с диэлектриком

$$V_L = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_0}} \approx 2.37 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$f_{\text{кр}}^{10} = \frac{k_{10}^{\text{кр}} \cdot V_L}{2\pi} \approx 4.39 \text{ ГГц}$$

$$V_{\phi}^{10}(f) = \frac{V_L}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{\text{кр}}^{10}}{f}\right)^2}}$$



Построение поля высшей волны TM_{22} в волноводе

$$\vec{E}_z' = B \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right),$$

$$\vec{E}_z = B \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z},$$

$$\gamma = j\beta,$$

$$\vec{H}_z' = 0.$$

Имеем векторные уравнения:

$$-k^2 \vec{E}_s' = \gamma \operatorname{grad}_s \vec{E}_z' + j\omega\mu_a \left[\operatorname{grad}_s \vec{H}_z', \vec{z}_0 \right],$$

$$-k^2 \vec{H}_s' = \gamma \operatorname{grad}_s \vec{H}_z' - j\omega\epsilon_a \left[\operatorname{grad}_s \vec{E}_z', \vec{z}_0 \right],$$

для волны типа ТМ справедливо

$$\vec{E}_s' = -\frac{\gamma}{k^2} \operatorname{grad}_s \vec{E}_z' = \vec{x}_0 \vec{E}_x' + \vec{y}_0 \vec{E}_y',$$

$$\vec{E}_x' = -\frac{j\beta}{k^2} \cdot \frac{m\pi}{a} B \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right),$$

$$\vec{E}_y' = -\frac{j\beta}{k^2} \cdot \frac{n\pi}{b} B \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right).$$

Для волн ТМ-типа выполняется:

$$\vec{H}_s' = \frac{j\omega\epsilon_a}{k^2} \left[\operatorname{grad}_s \vec{E}_z', \vec{z}_0 \right] = \frac{j\omega\epsilon_a}{k^2} \left[\frac{-k^2}{\gamma} \vec{E}_s', \vec{z}_0 \right] = -\frac{1}{\rho_E} \left[\vec{E}_s', \vec{z}_0 \right] = \frac{\omega\epsilon_a}{\beta} \left[\vec{z}_0, \vec{E}_s' \right],$$

$$\rho_E = \frac{\gamma}{j\omega\epsilon_a}, \quad \left[\vec{z}_0, \vec{E}_s' \right] = -\vec{x}_0 \vec{E}_y' + \vec{y}_0 \vec{E}_x',$$

$$\vec{H}_x' = -\frac{\omega\epsilon_a}{\beta} \vec{E}_y',$$

$$\vec{H}_y' = \frac{\omega\epsilon_a}{\beta} \vec{E}_x'.$$

Временные функции векторных составляющих магнитного и электрического полей:

$$e_z = \operatorname{Re} \left[\vec{E}_z' e^{-j\beta z} \right] = B \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos(\omega t - \beta z),$$

$$e_y = \operatorname{Re} \left[\vec{E}_y' e^{-j\beta z} \right] = \frac{\beta}{k^2} \cdot \frac{n\pi}{b} B \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \sin(\omega t - \beta z),$$

$$e_x = \operatorname{Re} \left[\vec{E}_x' e^{-j\beta z} \right] = \frac{\beta}{k^2} \cdot \frac{m\pi}{a} B \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \sin(\omega t - \beta z),$$

$$h_x = -\frac{\omega\epsilon_a}{k^2} \cdot \frac{n\pi}{b} B \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \sin(\omega t - \beta z),$$

$$h_y = \frac{\omega\epsilon_a}{k^2} \cdot \frac{m\pi}{a} B \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \sin(\omega t - \beta z),$$

$$h_z = 0.$$

Для полноты найдем также векторные составляющие вектора плотности тока смещения.

$$\overline{J_{\text{см}}} = \epsilon_a \frac{\partial \vec{E}}{\partial t},$$

$$J_{\text{см}x} = \epsilon_a \frac{\omega\beta}{k^2} \cdot \frac{m\pi}{a} B \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos(\omega t - \beta z),$$

$$J_{\text{см}y} = \epsilon_a \frac{\omega\beta}{k^2} \cdot \frac{n\pi}{b} B \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos(\omega t - \beta z),$$

$$J_{\text{см}z} = -\epsilon_a \omega B \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \sin(\omega t - \beta z).$$

Построим электрическое и магнитное поля, а также плотность тока смещения для разных сечений волновода.

$$m = 2, n = 2,$$

$$k_{\text{кр}} \approx 536.43 \text{ рад/м},$$

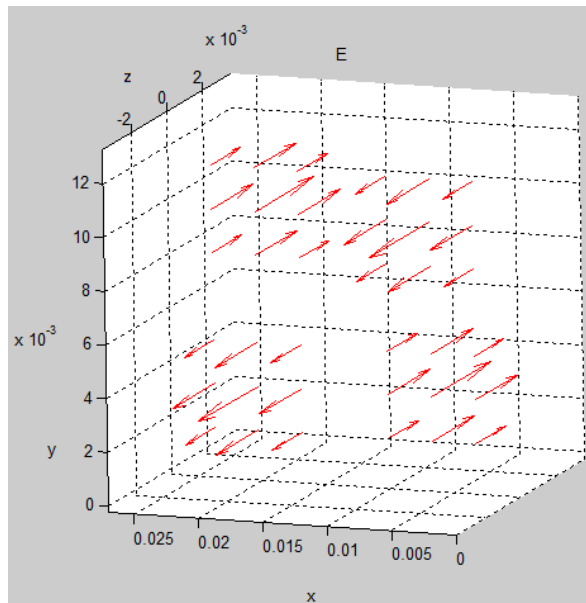
$$v_L = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}, \lambda_{\text{кр}} \approx 11.7 \text{ мм}, f_{\text{кр}} \approx 2.56 \cdot 10^{10} \text{ Гц},$$

$$f_p = 1.5 f_{\text{кр}} \approx 3.84 \cdot 10^{10} \text{ Гц}, \omega = 2\pi f_p \approx 2.41 \cdot 10^{11} \text{ рад/с},$$

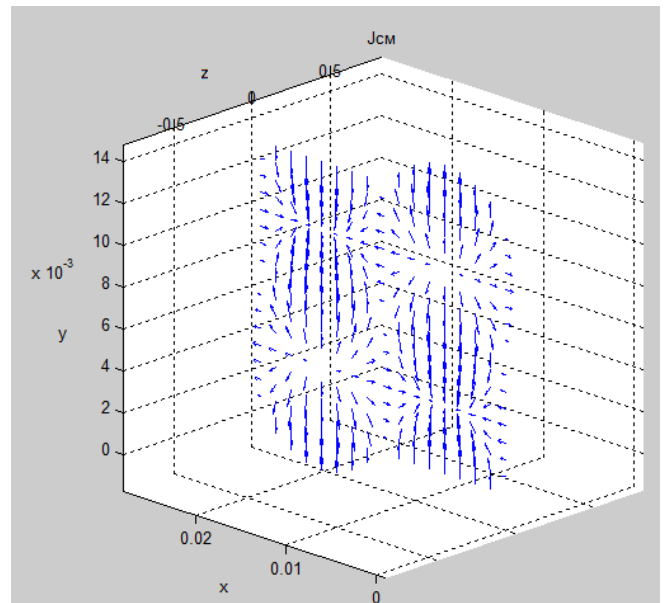
$$\lambda_B \approx 10.5 \text{ мм}, \beta = \frac{2\pi}{\lambda_B} \approx 599.74 \text{ рад/м},$$

считаем, что $B = 1$.

$$1. \omega t - \beta z = 0$$



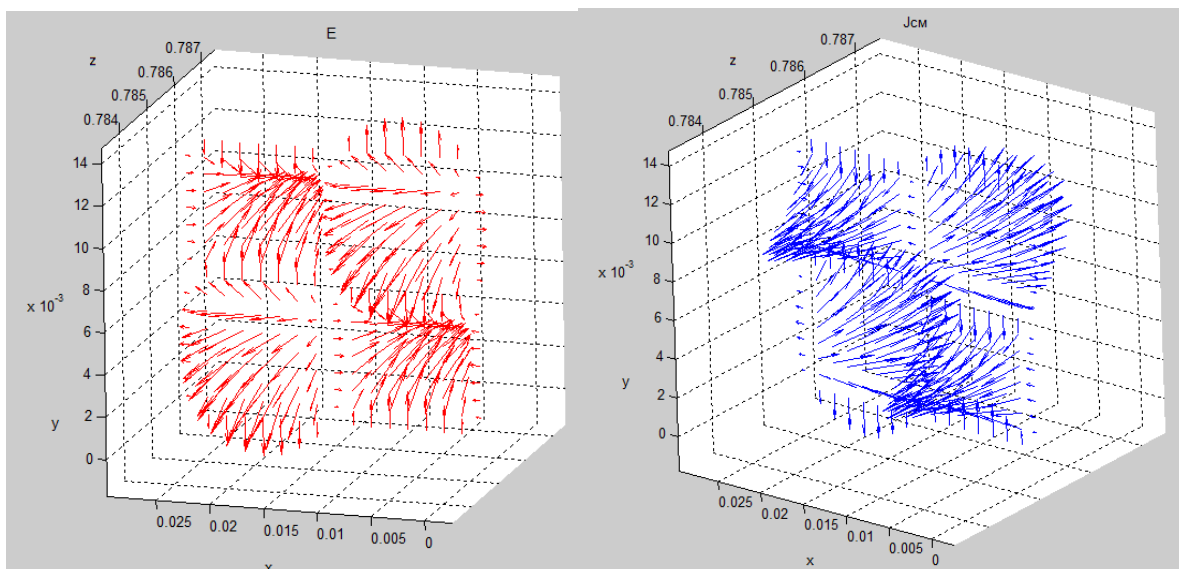
Электрическое поле.



Плотность тока смещения.

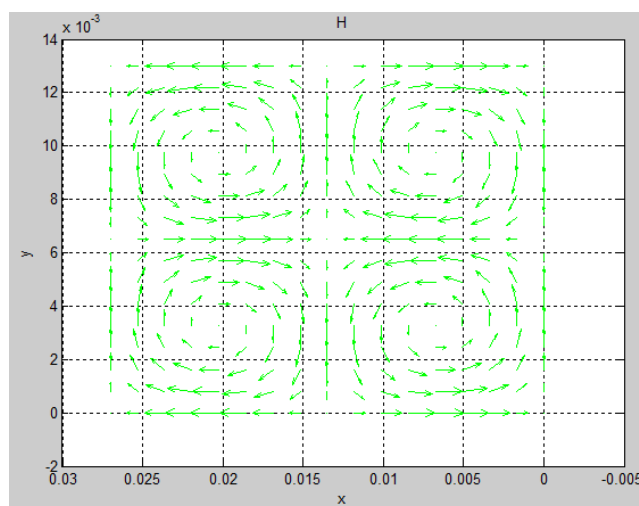
Магнитное поле в этом сечении отсутствует.

$$2. \omega t - \beta z = \frac{\pi}{4}$$



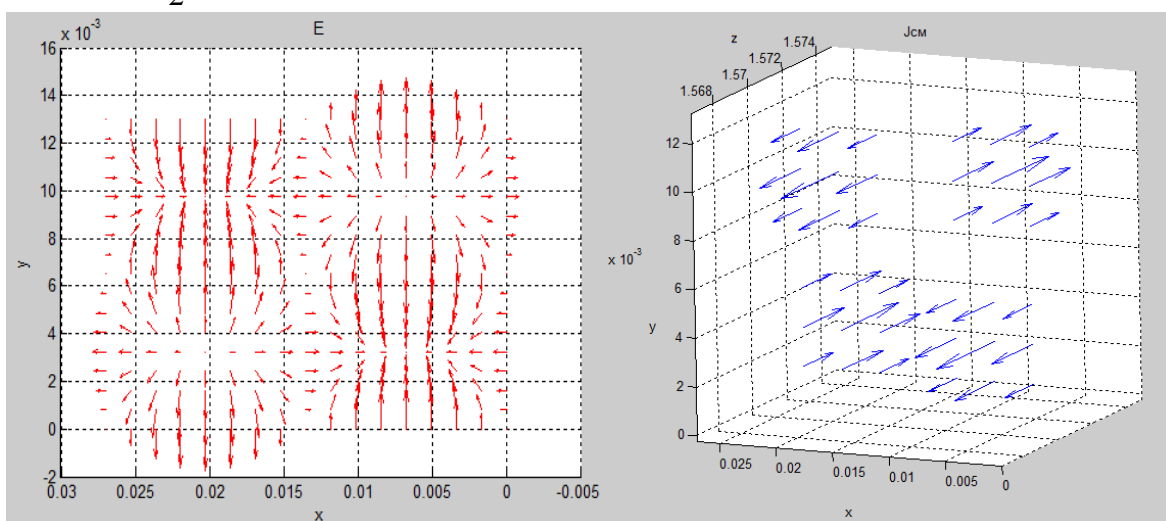
Электрическое поле.

Плотность тока смещения



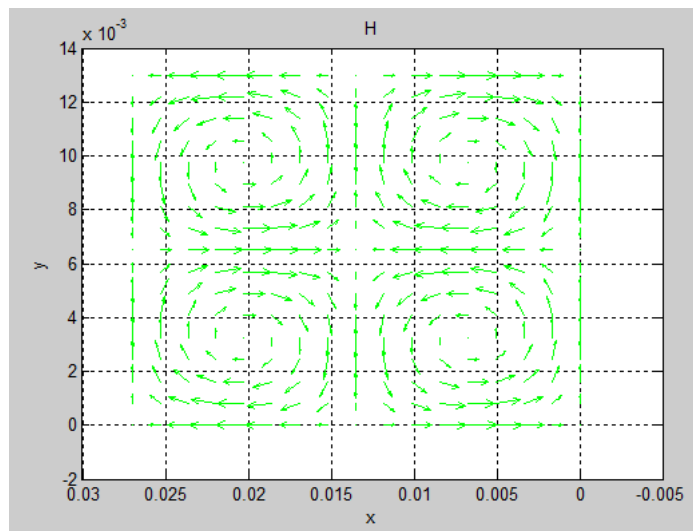
Магнитное поле

$$3. \omega t - \beta z = \frac{\pi}{2}$$



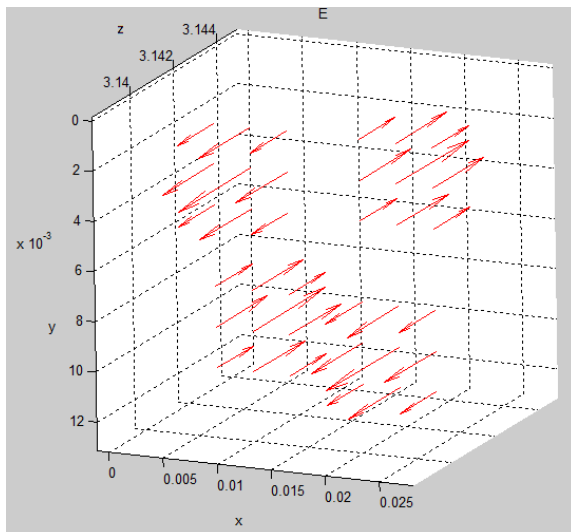
Электрическое поле.

Плотность тока смещения.

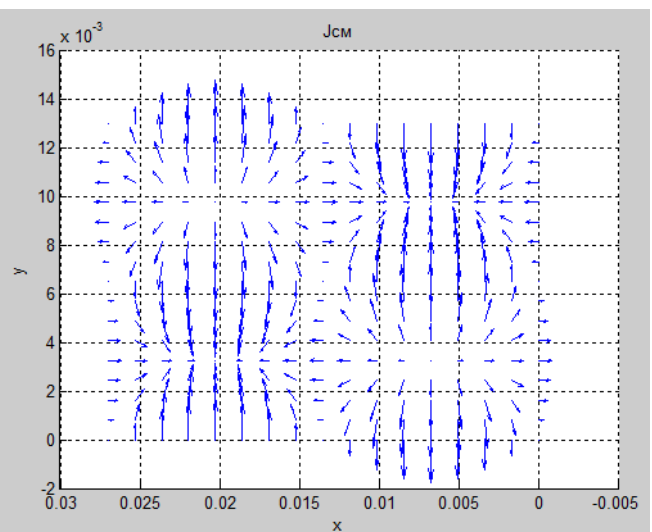


Магнитное поле

4. $\omega t - \beta z = \pi$



Электрическое поле.



Плотность тока смещения

Магнитное поле в этом сечении отсутствует.