

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
электроники



Усков Г.К.

20.05.2025 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
Б1.О.11 Электродинамика и распространение электромагнитных волн

1. Код и наименование направления подготовки/специальности:

11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

2. Профиль подготовки/специализация:

Инфокоммуникационные технологии и системы связи

3. Квалификация выпускника: бакалавр

4. Форма обучения: очная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины: электроники

6. Составители программы: Степкин Владислав Андреевич, к.ф.-м.н., доцент

7. Рекомендована: НМС физического факультета 20.05.2025, № протокола: 5

8. Учебный год: 2027/2028

Семестр: 5

9. Цели и задачи учебной дисциплины

Целями освоения учебной дисциплины являются: освоение студентами компетенций в области обеспечения функционирования устройств в системах радиосвязи с учётом особенностей распространения радиоволн различных диапазонов и влияния подстилающей поверхности, тропосферы и ионосферы.

Задачи учебной дисциплины: приобретение знаний и навыков решения задач в области электродинамики и распространения электромагнитных волн в свободном пространстве и различных средах, изучение особенностей взаимодействия электромагнитных волн со средой распространения, а также особенностей распространения электромагнитных волн различных диапазонов в свободном пространстве и в земных условиях, в том числе с учетом влияния тропосферы и ионосферы.

10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Дисциплина относится к базовой части учебного плана образовательной программы подготовки бакалавров по направлению 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи.

Предшествующие дисциплины: «Математический анализ», «Электричество и магнетизм», «Оптика»

11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями) и индикаторами их достижения:

Код	Название компетенции	Код(ы)	Индикатор(ы)	Планируемые результаты обучения
ОПК-1	Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности	ОПК-1.1	Демонстрирует знания фундаментальных законов природы и основных физических и математических законов	Знать: фундаментальные закономерности электродинамики Уметь: использовать в профессиональной деятельности знание фундаментальных закономерностей электродинамики Владеть: базовыми навыками решения задач по электродинамике
		ОПК-1.2	Применяет физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера	Знать: границы применимости моделей и основные методы исследований при решении задач распространения радиоволн Уметь: пользоваться моделями и современными подходами к исследованиям в области распространения радиоволн Владеть: навыком использования моделей и проведения исследований при решении задач распространения радиоволн
		ОПК-1.3	Использует положения, законы и методы естественных наук для решения инженерных задач в сфере профессиональной деятельности	Знать: границы применимости моделей и основные методы исследований при решении задач распространения радиоволн Уметь: пользоваться моделями и современными подходами к исследованиям в области распространения радиоволн Владеть: навыком использования моделей и проведения исследований при решении задач распространения радиоволн

		ОПК-1.4	Обладает фундаментальным и знаниями в области радиофизики и радиотехники и применяет их при решении задач профессиональной деятельности	Знать: фундаментальные закономерности электродинамики и распространения радиоволн в различных условиях: в свободном пространстве, над земной поверхностью, с учетом влияния тропосферы и ионосферы Уметь: использовать в профессиональной деятельности знание фундаментальных закономерностей распространения радиоволн в различных условиях: свободное пространство, над земной поверхностью, с учетом влияния тропосферы и ионосферы Владеть (иметь навык(и)): базовыми навыками решения задач в области распространения радиоволн в различных условиях: свободное пространство, над земной поверхностью, с учетом влияния тропосферы и ионосферы
ОПК-2	Способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных	ОПК-2.1	Находит и критически анализирует информацию, необходимую для решения поставленной задачи в рамках проводимого экспериментального исследования	Знать: основные инструменты для поиска научно-технической информации и методы экспериментальных исследований при решении задач распространения радиоволн Уметь: пользоваться основными инструментами для поиска научно-технической информации и методами экспериментальных исследований в области распространения радиоволн Владеть: навыком поиска научно-технической информации и проведения экспериментальных исследований в области распространения радиоволн
		ОПК-2.2	Разрабатывает решение конкретной задачи экспериментального исследования, выбирая оптимальный вариант, оценивая его достоинства и недостатки	Знать: основные подходы к решению задач электродинамики и распространения радиоволн Уметь: применять основные подходы к решению задач электродинамики и распространения радиоволн Владеть: навыком разработки решений конкретных задач электродинамики и распространения радиоволн
		ОПК-2.3	Применяет основные методы и средства проведения экспериментальных исследований	Знать: функциональные возможности стандартного программного обеспечения для задач в области распространения радиоволн Уметь: осуществлять выбор программного обеспечения, а при его отсутствии разрабатывать оригинальное программное обеспечение для решения задач в области распространения радиоволн Владеть: навыком работы со стандартным программным обеспечением, а при его отсутствии навыком разработки оригинального программного обеспечения для решения задач в области распространения радиоволн
		ОПК-2.4	Применяет способы обработки	Знать: стандартные методы обработки результатов экспериментального или

			и представления полученных данных и производит оценку погрешности результатов измерений	компьютерного эксперимента Уметь: использовать стандартные методы обработки результатов исследования Владеть: навыком обработки результатов исследования с использованием стандартных методов Знать: правила оформления результатов лабораторного или компьютерного эксперимента Уметь: осуществлять выбор программного обеспечения, необходимого для оформления результатов лабораторного или компьютерного эксперимента Владеть: навыком оформления результатов лабораторного или компьютерного эксперимента
--	--	--	---	--

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час. — 5 / 180.

Форма промежуточной аттестации экзамен

13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы		Трудоемкость	
		Всего	По семестрам
			5 семестр
Аудиторные занятия		84	84
в том числе:	лекции	34	34
	практические	16	16
	лабораторные	34	34
Самостоятельная работа		60	60
в том числе: курсовая работа (проект)		-	-
Форма промежуточной аттестации - экзамен		36	36
Итого:		180	180

13.1. Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК*
1. Лекции			
1.1.	Введение	Введение. Основные понятия.	-
1.2.	Понятие об электромагнитном поле. Уравнения Максвелла.	Корпускулярный и континуальный подходы в описании материальных объектов. Физические поля. Характеристики. Понятие о потоках и циркуляциях. Уравнение непрерывности. Законы сохранения массы, числа частиц и электрического заряда. Электрическое поле движущихся зарядов. Система уравнений Максвелла в вакууме и для сплошной среды.	
1.3.	Общие сведения о волновых процессах.	Волновые процессы, волновые уравнения. Электродинамические потенциалы. Вектор Герца. Плоские однородные электромагнитные волны. Поляризация электромагнитных волн.	
1.4.	Излучение	Источники излучения. Вибратор Герца. Уравнения	

	электромагнитных волн.	Гельмгольца. Функции Грина. Дальняя зона. Промежуточная область (зона Френеля). Близкая зона. Элементарные излучатели. Характеристики направленности антенн.	
1.5.	Распространение радиоволн в свободном пространстве	Механизм распространения радиоволн. Принцип Гюйгенса-Френеля. Зоны Френеля. Дифракция радиоволн на круглом отверстии и краю непрозрачного экрана. Зависимость напряженности поля радиоволны от расстояния при распространении в свободном пространстве. Учет характеристик направленности излучателей.	-
1.6.	Распространение земных радиоволн в непосредственной близости к поверхности	Относительная комплексная диэлектрическая проницаемость. Приближенные граничные условия Леонтовича. Структура поля радиоволны в пункте приема. Наклон фронта радиоволны, горизонтальные антенны. Формула Шулейкина-Вандер Поля.	-
1.7.	Распространение земных радиоволн при поднятых антеннах	Понятие поднятых антенн. Геометрия задачи. Интерференционные формулы. Формула Введенского. Учет сферичности Земли при использовании интерференционных формул. Дальность до горизонта и расстояние прямой видимости. Понятие приведенных высот. Границы применимости интерференционных формул. Представление о дифракционных формулах.	-
1.8.	Влияние тропосферы на распространение земных радиоволн	Особенности влияния тропосферы на распространение радиоволн. Тропосферная рефракция. Учет рефракции в интерференционных формулах. Понятие эквивалентного радиуса Земли. Тропосферное рассеяние. Флуктуационные процессы в тропосфере. Многолучевость и замирания сигнала.	-
1.9.	Особенности распространения ионосферных радиоволн	Особенности распространения радиоволн в ионосфере. Преломление и отражение. Фазовая и групповая скорости радиоволны, распространяющейся в ионосфере.	-
2. Практические занятия			
2.1	Понятие об электромагнитном поле. Уравнения Максвелла.	Расчет потока и циркуляции. Формулирование задач электродинамики. Электрическое поле зарядов.	-
2.2	Общие сведения о волновых процессах.	Расчет электродинамических потенциалов.	-
2.3	Излучение электромагнитных волн.	Расчет поля элементарных излучателей.	-
2.4	Распространение радиоволн	Расчет напряженности электрической составляющей поля волны при распространении в различных условиях: в свободном пространстве, над поверхностью Земли, с учетом рефракции и влиянием ионосферы.	-
3. Лабораторные занятия			
3.1	Введение	Расчет характеристик направленности излучателей.	-
3.2	Распространение радиоволн в свободном пространстве	Расчет, построение графиков и анализ зависимости от расстояния напряженности поля радиоволны, распространяющейся в свободном пространстве.	-
3.3	Распространение земных радиоволн в непосредственной близости к поверхности	Расчет, построение графиков и анализ зависимости от расстояния напряженности поля земной радиоволны, распространяющейся в непосредственной близости к поверхности.	-
3.4	Распространение земных радиоволн при поднятых антеннах	Расчет, построение графиков и анализ зависимости от расстояния напряженности поля земной радиоволны при поднятых передающей и	-

		приемной антеннах для плоской и сферической поверхности Земли.	
3.5	Влияние тропосферы на распространение земных радиоволн	Расчет, построение графиков и анализ зависимости от расстояния напряженности поля земной радиоволны при поднятых передающей и приемной антеннах с учетом тропосферной рефракции.	-

13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (количество часов)				
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	Всего
1.	Введение	2			2	4
2.	Понятие об электромагнитном поле. Уравнения Максвелла.	4	2	2	6	14
3.	Общие сведения о волновых процессах.	4	2		7	13
4.	Излучение электромагнитных волн.	4	2	6	8	20
5.	Распространение радиоволн в свободном пространстве	4	2	6	7	19
6.	Распространение земных радиоволн в непосредственной близости к поверхности	4	2	6	8	20
7.	Распространение земных радиоволн при поднятых антеннах	4	2	8	8	22
8.	Влияние тропосферы на распространение земных радиоволн	4	2	6	6	18
9.	Особенности распространения ионосферных радиоволн	4	2		8	14
	Итого:	34	16	34	60	144

14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины:

Изучение материалов лекций и самостоятельная работа с рекомендуемой литературой является достаточным условием для успешного освоения дисциплины. Работа в семестре контролируется путем тестирования, в котором проверяется освоение базовых знаний, и выполнения лабораторных работ с подготовкой отчетов, посредством которых формируются навыки работы с научно-технической литературой, применения полученных знаний при решении практических задач, умение оформлять результаты работы и формулировать мысли.

При использовании дистанционных образовательных технологий и электронного обучения выполнять все указания преподавателей, вовремя подключаться к онлайн-занятиям, ответственно подходить к выполнению заданий для самостоятельной работы.

15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Электродинамика и распространение радиоволн : Учебное пособие / под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского . — изд. 3-е, доп. и перераб. — М. : Радиотехника., 2007 .— 744 с. : ил. — ISBN 978-5-88070-154-4.

2	Долуханов, Марк Павлович. Распространение радиоволн / М. Долуханов .— 4-е изд. — М. : Связь, 1972 .— 336 с. : черт.
3	Грудинская, Галина Петровна. Распространение радиоволн : учебное пособие для студ. радиотехн. спец. вузов / Г.П. Грудинская .— 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Высшая школа, 1975 .— 279,[1] с. : ил., табл.

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
3	Баскаков, Святослав Иванович. Электродинамика и распространение радиоволн : Учебное пособие для студ. радиотехн. специальностей вузов / С.И. Баскаков .— М. : Высш. шк., 1992 .— 416 с. : ил. — ISBN 5060020371 : 13.75.
4	Атмосферная турбулентность и распространение радиоволн : Труды международного коллоквиума, Москва, 15-22 июня, 1965 г. / АН СССР, Межведомственный геофизический комитет, Ин-т физики атмосферы; Под ред. А.М. Яглома и В.И. Татарского .— М. : Наука, 1967 .— 373,[1] с. : ил.

в) информационные электронно-образовательные ресурсы (официальные ресурсы интернет)*:

№ п/п	Ресурс
1	edu.vsu.ru – Электронный университет ВГУ
2	Электронная библиотека Зональной научной библиотеки Воронежского госуниверситета : электронно-библиотечная система. URL : https://lib.vsu.ru/zgate?lnit+elib.xml,simple_elib.xsl+rus
3	Электронно-библиотечная система "Издательство "Лань" : электронно-библиотечная система. URL : https://lib.vsu.ru/?p=4&t=2d&id=1308
4	Электронно-библиотечная система "Университетская библиотека online": электронно-библиотечная система. URL : https://lib.vsu.ru/?p=4&t=2d&id=1307
5	Электронно-библиотечная система "Консультант студента": электронно-библиотечная система. URL : https://lib.vsu.ru/?p=4&t=2d&id=1306
6	Электронно-библиотечная система «ЮРАЙТ»: электронно-библиотечная система. URL : https://lib.vsu.ru/?p=4&t=2d&id=1457

16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы

№ п/п	Источник
1	edu.vsu.ru – Электронный университет ВГУ

17. Образовательные технологии, используемые при реализации учебной дисциплины, включая дистанционные образовательные технологии (ДОТ, электронное обучение (ЭО), смешанное обучение):

При реализации дисциплины для проведения текущего контроля и в качестве информационного ресурса используются технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии на базе образовательного портала "Электронный университет ВГУ" по адресу edu.vsu.ru, а также другие доступные ресурсы сети Интернет.

18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Мультимедийная аудитория (ауд. 401): специализированная мебель, компьютеры, проектор, экран, комплекс для проведения лекций, семинаров и презентаций, NI USRP – программируемые радио в комплекте с антеннами, цифровые осциллографы GWinstek GDS-71102B

Microsoft Windows, Open Office, браузер Google Chrome, MatLab

Помещение для самостоятельной работы обучающихся (ауд. 423): специализированная мебель, компьютеры с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ВГУ

Microsoft Windows, Linux, OpenOffice, браузер Google Chrome

Помещение для самостоятельной работы обучающихся (ауд. 410): специализированная мебель, компьютеры с возможностью подключения к сети

«Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ВГУ

Microsoft Windows, Linux, OpenOffice, браузер Google Chrome, MatLab, NI LabView, Python

Компьютерный класс (ауд. 412) специализированная мебель, принтер, сканер, компьютеры с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ВГУ

WinPro, Linux Mint, Open Office, AWR Studio, Anaconda, MicroCap Evaluation, Maxima, Octave, ColD, Cube, Lazarus

Помещение для самостоятельной работы обучающихся (ауд. 407): специализированная мебель, компьютеры с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ВГУ

WinPro, OfficeSTD, Интернет-браузер Google Chrome Mozilla Firefox, MatLab, NI LabView, Python

19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
1	Введение	ОПК-1	ОПК 1.1 ОПК 1.3	<i>Тест</i> (https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4342) <i>Решение задач</i> <i>Отчет по лабораторной работе</i>
2	Понятие об электромагнитном поле. Уравнения Максвелла	ОПК-1	ОПК 1.1 ОПК 1.2 ОПК 1.3	
3	Общие сведения о волновых процессах	ОПК-1	ОПК 1.1 ОПК 1.2 ОПК 1.3	
4	Излучение электромагнитных волн	ОПК-1 ОПК-2	ОПК 1.2 ОПК 1.3 ОПК-2.1 ОПК-2.3	
5	Распространение радиоволн в свободном пространстве	ОПК-1 ОПК-2	ОПК 1.2 ОПК 1.3 ОПК-2.1 ОПК-2.2 ОПК-2.3 ОПК-2.4	<i>Тест</i> (https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4342) <i>Решение задач</i> <i>Отчет по лабораторной работе</i>
6	Распространение земных радиоволн в непосредственной близости к поверхности	ОПК-1 ОПК-2	ОПК 1.2 ОПК 1.3 ОПК-2.1 ОПК-2.2 ОПК-2.3 ОПК-2.4	
7	Распространение земных радиоволн при поднятых антеннах	ОПК-1 ОПК-2	ОПК 1.2 ОПК 1.3 ОПК-2.1 ОПК-2.2 ОПК-2.3 ОПК-2.4	<i>Тест</i> (https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4342) <i>Решение задач</i> <i>Отчет по лабораторной работе</i>
8	Влияние тропосферы на распространение земных радиоволн	ОПК-1 ОПК-2	ОПК 1.2 ОПК 1.3 ОПК-2.2 ОПК-2.4	<i>Тест</i> (https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4342) <i>Решение задач</i> <i>Отчет по лабораторной работе</i>

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
9	Особенности распространения ионосферных радиоволн	ОПК-1 ОПК-2	ОПК 1.2 ОПК 1.3 ОПК-2.2 ОПК-2.4	
Промежуточная аттестация форма контроля – зачет				<i>Перечень вопросов Лабораторное задание Практические задания</i>

20. Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания

Оценка знаний, умений и навыков, характеризующая этапы формирования компетенций в рамках изучения дисциплины осуществляется в ходе текущей и промежуточной аттестаций.

Текущая аттестация проводится в соответствии с Положением о текущей аттестации обучающихся по программам высшего образования Воронежского государственного университета. Текущая аттестация проводится в формах выполнения практико-ориентированных заданий - лабораторных работ и тестирования на портале Электронный университет ВГУ.

Промежуточная аттестация проводится в соответствии с Положением о промежуточной аттестации обучающихся по программам высшего образования.

20.1. Текущий контроль успеваемости

Контроль успеваемости по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

Тестирование

Тестовые задания, банки вопросов и шкала для оценивания размещены в электронном курсе на портале Электронный университет ВГУ по адресу: <https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4342>

20.2. Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

Перечень вопросов на знание теоретической части дисциплины

1. Корпускулярный и континуальный подходы в описании материальных объектов. Физические поля. Характеристики. Понятие о потоках и циркуляциях. Уравнение непрерывности.
2. Законы сохранения массы, числа частиц и электрического заряда. Электрическое поле движущихся зарядов. Система уравнений Максвелла в вакууме и для сплошной среды.
3. Волновые процессы, волновые уравнения. Электродинамические потенциалы. Вектор Герца. Плоские однородные электромагнитные волны. Поляризация электромагнитных волн.
4. Источники излучения. Вибратор Герца.
5. Уравнения Гельмгольца. Функции Грина. Дальняя зона. Промежуточная область (зона Френеля). Ближняя зона.
6. Элементарные излучатели. Характеристики направленности антенн.
7. ЭМ и радиоволны. Волновой процесс. Радиотрасса. Классификация радиоволн по способу распространения.
8. Потери при распространении. Понятие множителя ослабления.
9. Понятие комплексной диэлектрической проницаемости среды. Физический смысл.
10. Понятие поднятой антенны. Диаграмма направленности, коэффициент направленного действия, коэффициент усиления антенны. Диаграмма направленности антенны в свободном пространстве и над поверхностью Земли.
11. Область пространства, эффективно участвующая в передаче энергии радиоволн. Зоны Френеля.

12. Интерференционные формулы в условиях распространения радиоволн над плоской поверхностью. Их суть (физический смысл).
13. Формула Введенского. Физический смысл. Пояснить зависимость напряженности поля радиоволны от расстояния. Связь с интерференционной формулой.
14. Приближенные граничные условия Леонтовича. Их суть (физический смысл).
15. Задача распространения радиоволн непосредственно над разделом двух сред (земля-воздух). Формула Шулейкина-Ван дер Поля.
16. Структура поля волны в точке приема при распространении непосредственно над поверхностью Земли. Наклон фронта волны. Горизонтальные антенны.
17. Понятие прямой видимости. Расчет параметров поля волны с учетом сферичности поверхности.
18. Расчет параметров поля волны, распространяющейся над неоднородной поверхностью.
19. Тропосферная рефракция: причины, виды. Радиус кривизны траектории. Расчет параметров поля радиоволны, распространяющейся в условиях рефракции.
20. Сверхрефракция: причины, условия, в чем проявляется. Расчет параметров поля радиоволны, распространяющейся в условиях сверхрефракции.
21. Диэлектрическая проницаемость ионосферы. Причины возникновения явления преломления при распространении радиоволн в ионосфере.
22. Условия отражения от ионизированного слоя.
23. Фазовая и групповая скорости волны в ионосфере.
24. Многолучевость: причины ее возникновения, виды. Замирания сигнала, характеристики замираний.

Лабораторное задание

1. Провести моделирование излучающей системы в специализированном программном обеспечении. Рассчитать диаграммы направленности. Сделать анализ направленных свойств антенны.
2. Настроить программно-определяемое радио, провести экспериментальное исследование особенностей распространения радиоволн в различных условиях (в соответствии с заданием преподавателя)

Перечень практических заданий

1. Построить зависимости напряженности поля радиоволны, распространяющейся в свободном пространстве:

$$E_1(r, \varphi) = 173 \frac{\sqrt{P_1 D_1(\varphi)}}{r}$$

2. Построить зависимости напряженности поля радиоволны, распространяющейся над плоской поверхностью Земли при поднятых антеннах:

$$h_1 = 15 \text{ м}, h_2 = 30 \text{ м}$$

$$E_2(r, \varphi) = 173 \frac{\sqrt{P_1 D_1(\varphi)}}{r} \cdot F_2;$$

$$F_2 = 2 \left| \sin\left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda r}\right) \right|$$

3. Построить зависимости напряженности поля радиоволны, распространяющейся над плоской поверхностью Земли при поднятых антеннах при расстоянии между ними, превышающем $18h_1 h_2 / \lambda$:

$$E_3(r, \varphi) = 173 \frac{\sqrt{P_1 D_1(\varphi)}}{r} \cdot F_3;$$

$$F_3 = \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r}$$

4. Построить зависимости напряженности поля радиоволны, распространяющейся в непосредственной близости над плоской поверхностью Земли: для двух случаев $\epsilon_1 = 40$; $\sigma_1 = 0.01$ и $\epsilon_2 = 3$; $\sigma_2 = 10000$

$$E_4(r, \varphi) = 245 \frac{\sqrt{P_1 D_1(\varphi)}}{r} \cdot F_4;$$

$$F_4 = \frac{2 + 0,3x}{2 + x + 0,6x^2}; x = \frac{\pi \cdot r}{\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2}}$$

5. Построить зависимости напряженности поля радиоволны, распространяющейся над сферической поверхностью Земли при поднятых антеннах:

$$E_5(r, \varphi) = 173 \frac{\sqrt{P_1 D_1(\varphi)}}{r} \cdot F_5;$$

$$F_5 = 2 \left| \sin\left(\frac{2\pi h'_1 h'_2}{\lambda r}\right) \right|;$$

$$h'_1 = h_1 - \frac{r_1^2}{2a}$$

$$h'_2 = h_2 - \frac{r_2^2}{2a}$$

$$r_1 = r \frac{h_1}{h_1 + h_2}$$

$$r_2 = r \frac{h_2}{h_1 + h_2}$$

или

$$r_1 = r \frac{\sqrt{h_1}}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}}$$

$$r_2 = r \frac{\sqrt{h_2}}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}}$$

для $r \ll r_0$
[0; 0,1 r_0]

для $r \rightarrow r_0$
[0,7 r_0 ; 0,8 r_0]

при $r = [0,1 r_0; 0,7 r_0]$ брать среднее арифметическое между двумя значениями

$a = 6371$ км

6. Построить зависимости напряженности поля радиоволны, распространяющейся над сферической поверхностью Земли при поднятых антеннах и с учетом тропосферной рефракции:

Использовать формулы п.5, подставив вместо радиуса Земли (a) эквивалентный радиус (a_s), найденный для параметров нормальной тропосферы.

Проверка усвоения теоретической части осуществляется с помощью тестовых заданий. Тестовые задания и банки вопросов размещены в электронном курсе на портале Электронный университет ВГУ по адресу: <https://edu.vsu.ru/course/view.php?id=4342>

Практические задания должны быть выполнены с помощью специализированного или стандартного программного обеспечения, по их результатам должен быть представлен отчет.