

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

**Радиофизический факультет**  
(факультет / институт / филиал)

---

УТВЕРЖДЕНО  
решением ученого совета ННГУ  
протокол от  
«31» мая 2023 г. № 6

**Рабочая программа дисциплины**

**Электродинамика и распространение радиоволн**  
(наименование дисциплины (модуля))

---

Уровень высшего образования  
специалитет  
(бакалавриат / магистратура / специалитет)

---

Направление подготовки / специальность  
**11.05.02 Специальные радиотехнические системы**  
(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

---

Направленность образовательной программы  
**Радиотехнические системы и комплексы специального назначения**  
(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

---

Форма обучения  
очная  
(очная / очно-заочная / заочная)

---

Нижний Новгород

2023 год

## 1. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина Б1.О.25 «Электродинамика и распространение радиоволн» относится к обязательной части ООП направления подготовки 11.05.02 Специальные радиотехнические системы.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	
<b>ОПК-1</b>  Способен использовать в профессиональной деятельности основные законы естественнонаучных дисциплин, применять методы математического анализа и моделирования, теоретических и экспериментальных исследований, приобретать новые математические и естественнонаучные знания, используя современные образовательные и информационные технологии	<b>ОПК-1.1.</b> Рассматривает основные разделы математических и естественнонаучных дисциплин	Знать основные законы электродинамики и распространения радиоволн Уметь систематизировать знания и сопоставлять различные физические явления теоретическому описанию Владеть навыками использования основных разделов электродинамики при решении практических задач	Задача (практическое задание), собеседование, коллоквиум
	<b>ОПК-1.2.</b> Применяет основные законы естественнонаучных дисциплин, методы математического анализа и моделирования, теоретических и экспериментальных исследований	Знать основные методы математического анализа и моделирования физических явлений Уметь применять основные законы электродинамики к моделированию физических явлений Владеть навыками решения стандартных задач электродинамики и распространения радиоволн	Задача (практическое задание), собеседование, коллоквиум
<b>ОПК-7</b>  Способен применять методы анализа и расчета характеристик	<b>ОПК-7.1.</b> Понимает основные методы анализа и расчета характеристик радиотехнических цепей, аналоговых и цифровых узлов	Знать основные методы анализа и расчета характеристик радиотехнических цепей, аналоговых и цифровых узлов Уметь анализировать физические аспекты теории и возможности ее использования для моделирования волновых процессов в цепях	Задача (практическое задание), собеседование, коллоквиум

<i>радиотехнических цепей, аналоговых и цифровых узлов современной электроники</i>		анализа и оптимизации их параметров <i>Владеть</i> навыками анализа и расчета характеристик радиотехнических цепей, аналоговых и цифровых узлов	
	<i>ОПК-7.2. Использует основные методы анализа и расчета характеристик радиотехнических цепей, аналоговых и цифровых узлов</i>	<i>Знать</i> основные методы анализа и расчета характеристик радиотехнических цепей, аналоговых и цифровых узлов <i>Уметь</i> анализировать физические аспекты теории и возможности ее использования для моделирования волновых процессов в целях анализа и оптимизации их параметров <i>Владеть</i> навыками анализа и расчета характеристик радиотехнических цепей, аналоговых и цифровых узлов	Задача (практическое задание), собеседование, коллоквиум

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная форма обучения</b>
<b>Общая трудоемкость</b>	<b>8 ЗЕТ</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>288</b>
<b>в том числе</b>	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	<b>80</b>
- занятия семинарского типа	<b>48</b>
( практические занятия / лабораторные работы)	
<b>самостоятельная работа</b>	<b>75</b>
<b>КСР</b>	<b>4</b>
<b>Промежуточная аттестация – экзамен</b>	<b>81</b>

### 3.2. Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе															
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них													Самостоятельная работа обучающегося, часы		
		Занятия лекционного типа					Занятия семинарского типа			Занятия лабораторного типа			Всего				
	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная
Часть I																	
Введение	2			1			-					1			1		
Основные уравнения макроскопической электродинамики и общие свойства электромагнитных полей	10			4			-					4			6		
Электростатика	58			18			10					28			30		
Постоянные токи	10			2			2					4			6		
Магнитостатика	24			6			6					12			12		
Переменные электромагнитные поля. Общее описание	6			2			-					2			4		
Электродинамика квазистационарных процессов	14			3			3					6			8		
Волны в однородных средах	14			3			3					6			8		
Волны в неоднородных изотропных средах	16			3			4					7			9		
Излучение заданных источников в безграничной однородной изотропной среде	26			6			6					12			14		
Промежуточная аттестация – Экзамен																	

Часть II																	
Введение	3			1			1					2			1		
Канал связи	6			1			1					2			4		
Электромагнитные волны в средах	8			2			1					3			5		
Распространение радиоволн вдоль земной поверхности	26			8			4					12			14		
Распространение радиоволн ОНЧ-диапазона в волноводе Земля-ионосфера	18			6			2					8			10		
Распространение радиоволн в ионосфере	26			8			4					12			14		
Распространение радиоволн в тропосфере	21			6			5					11			10		
Промежуточная аттестация – Экзамен																	
Итого	288			80			52					132			156		

Содержание разделов дисциплины:

## ЧАСТЬ I.

### 1. Введение

- 1.1. Основные этапы развития теории электромагнитного поля. Общий характер построения читаемого курса.
- 1.2. Элементы векторного и тензорного исчисления (краткая сводка основных формул и понятий). Скалярные, векторные и тензорные величины. Дифференциальные операции первого и второго порядков. Дифференциально-векторные тождества. Интегральные теоремы. Криволинейные системы координат.

### 2. Основные уравнения макроскопической электродинамики и общие свойства электромагнитных полей

- 2.1. Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной формах для полей, зарядов и токов в вакууме. Понятие напряженностей электрического и магнитного полей, плотностей тока и заряда. Постулаты, связывающие электромагнитные явления с механическими (выражения для плотности энергии поля и силы Лоренца). Пределы применимости уравнений классической электродинамики.
- 2.2. Макроскопические уравнения Максвелла (в дифференциальной и интегральной формах) для поля в материальной среде как результат усреднения микроскопических уравнений классической электронной теории. Понятие векторов средних макроскопических напряженностей электрического и магнитного полей, электрической и магнитной поляризации и индукции.
- 2.3. Материальные уравнения для различных сред. Диэлектрическая и магнитная проницаемости, проводимость. Сторонние источники. Понятие временной и

пространственной дисперсии. Ток и поляризация как результат воздействия полей на среду и как источник этих полей.

- 2.4. Граничные условия для тангенциальных и нормальных компонент векторов поля на произвольной поверхности. Понятие поверхностных зарядов и токов.
- 2.5. Важнейшие общие свойства уравнений Максвелла и их решений. Скаляры, векторы и псевдовекторы в уравнениях Максвелла. Линейность уравнений и принцип суперпозиции решений. Обратимость уравнений во времени. Принцип перестановочной двойственности и магнитные источники.
- 2.6. Законы сохранения, следующие из уравнений Максвелла. Закон сохранения заряда (уравнение непрерывности). Закон сохранения энергии (теорема Пойнтинга). Вектор Пойнтинга и понятие потока электромагнитной энергии. Плотность электромагнитной энергии в среде без дисперсии. Джоулевы потери. Закон сохранения импульса. Понятие плотности электромагнитного импульса и тензора натяжений для поля в вакууме.
- 2.7. Теорема единственности решения уравнений Максвелла при заданных начальных и граничных условиях.
- 2.8. Классификация основных типов электромагнитных явлений: электростатика, токостатика, магнитостатика, квазистационарные процессы, быстропеременные (волновые) поля.

### 3. Электростатика

- 3.1. Уравнения электростатического поля. Скалярный потенциал. Уравнения Пуассона и Лапласа. Граничные условия для потенциала на поверхностях проводников и диэлектриков.
- 3.2. Некоторые общие теоремы электростатики. Теорема единственности решения. Теорема о минимуме и максимуме потенциала. Теорема Ирншоу. Теорема взаимности. Классификация задач электростатики, прямые и обратные задачи.
- 3.3. Прямая задача электростатики для безграничной однородной среды. Функция Грина. Общее решение уравнения Пуассона. Потенциал простого и двойного слоя. Поле произвольной системы зарядов на большом расстоянии от нее. Разложение по мультиполям. Дипольный момент. Тензор квадрупольного момента.
- 3.4. Методы решения прямой задачи при наличии проводников и неоднородных диэлектриков (краевые задачи).
  - а) Конструктивные методы: металлизация эквипотенциальных поверхностей; метод изображений; метод заполнения диэлектриком.
  - б) Метод разделения переменных. Разделение переменных в уравнении Лапласа в декартовой, цилиндрической и сферической системах координат. Задача о диэлектрическом шаре в однородном внешнем поле.
  - в) Понятие о методе инверсии, методе конформных преобразований, методе возмущений.
- 3.5. Обратная задача электростатики.
- 3.6. Дискретное описание электростатических систем. Линейные соотношения между зарядами и потенциалами проводников. Свойства потенциальных и емкостных коэффициентов. Понятие емкости. Электростатические цепи.
- 3.7. Энергия электростатического поля. Представление в виде интеграла по области источников. Собственная и взаимная энергия различных подсистем. Энергия взаимодействия внешнего поля с точечным зарядом и точечным диполем. Энергия системы проводников. Теорема Томсона о минимуме электростатической энергии.
- 3.8. Силы в электростатическом поле. Энергетический метод расчета обобщенных сил. Связь между вариацией энергии и работой сторонних сил в системе проводников с постоянными зарядами или постоянными потенциалами. Силы, действующие на

заряд и диполь во внешнем поле; момент сил, действующих на диполь. Плотность силы, действующей на поверхность проводника.

#### 4. Постоянные токи

Уравнения теории постоянных токов в проводящей среде. Граничные условия для плотности тока. Понятие идеального электрода и идеального изолятора. Формальная аналогия с электростатикой; примеры ее использования для решения токовых задач. Понятие сопротивления. Закон Джоуля-Ленца. Токи в квазилинейных проводниках. Законы Кирхгофа.

#### 5. Магнитостатика

- 5.1. Уравнения, описывающие магнитное поле постоянных токов. Векторный потенциал. Уравнение для векторного потенциала в однородной среде и его решение. Закон Био-Савара.
- 5.2. Поле произвольной системы токов на большом расстоянии от нее. Магнитный дипольный момент. Поле магнитного диполя.
- 5.3. Скалярный потенциал магнитного поля. Магнитный листок как эквивалент линейного контура с током. Аналогия между магнитостатическими и электростатическими полями как проявление принципа двойственности. Конструктивные и прямые методы решения краевых задач магнитостатики, аналогичные электростатическим.
- 5.4. Поля, создаваемые намагниченными телами. Замена намагниченности эквивалентными электрическими токами или магнитными зарядами. Магнитные цепи. Понятие магнитного сопротивления. Законы Кирхгофа для магнитных цепей.
- 5.5. Энергия и силы в магнитном поле. Представление энергии в виде интеграла по области источников. Энергия системы квазилинейных токов. Коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции. Сила, действующая на элемент квазилинейного контура с током. Сила и вращающий момент, действующие на магнитный диполь. Плотность объемной силы и тензор натяжений магнитного поля в среде.

#### 6. Переменные электромагнитные поля. Общее описание

- 6.1. Постановка задачи и различные приближения. Описание переменного электромагнитного поля в общем случае. Дифференциальные уравнения второго порядка для электромагнитных полей. Описание с помощью потенциалов. Градиентная инвариантность. Условие калибровки Лоренца. Волновые уравнения для потенциалов. Вектор Герца. Магнитные потенциалы.
- 6.2. Гармонические процессы. Комплексная запись полей и уравнений Максвелла. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Связь комплексных полей с потенциалами. Возможность оперирования с произведением комплексных векторов. Комплексная теорема Пойнтинга. Теорема единственности решения уравнений Максвелла для гармонических полей.

#### 7. Электродинамика квазистационарных процессов

- 7.1. Квазистационарные процессы в проводящих средах. Распределение переменных полей и токов в проводящем полупространстве. Скин-эффект. Граничные условия Леонтовича. Энергетические соотношения при скин-эффекте.

7.2. Квазистационарные процессы в квазилинейных цепях с сосредоточенными параметрами. Возможность пренебрежения запаздыванием передачи взаимодействия и выделение зоны квазистатики. Законы Кирхгофа для цепей с переменными токами.

## 8. Волны в однородных средах

- 8.1. Однородные и неоднородные плоские волны в непоглощающей изотропной среде. Ориентация векторов электрического и магнитного поля. Дисперсионное соотношение. Поляризация волны, длина волны, фазовая скорость, характеристический импеданс (волновое сопротивление). Плотность потока энергии в плоской волне. Плоские волны в поглощающей среде.
- 8.2. Неоднородная плоская волна как суперпозиция двух однородных плоских волн. Поляризация поля в такой волне, длина волны, фазовая скорость, поперечный волновой импеданс, плотность потока энергии. Конструирование поля в волноводе и колебаний в резонаторе из однородных плоских волн. Пример: волна типа TE<sub>10</sub> в прямоугольном волноводе.
- 8.3. Изотропные среды с временной дисперсией. Связь между индукцией и напряженностью поля. Квазимонохроматические процессы. Энергия монохроматического поля в среде с временной дисперсией. Распространение импульсного сигнала в среде с временной дисперсией. Групповая скорость и скорость энергии. Диффузионное уравнение для огибающей импульса. Расплывание импульса. Пример: колоколообразный импульс, описываемый функцией Гаусса.

## 9. Волны в неоднородных изотропных средах

- 9.1. Отражение и преломление плоских волн на плоской границе раздела двух сред (формулы Френеля). Нормальное падение. Выражение коэффициента отражения через поперечные волновые импедансы. Формула пересчета импеданса. Использование ее для отыскания коэффициента отражения от плоскопараллельной пластинки. Наклонное падение. Угол Брюстера. Полное внутреннее отражение. Возникновение неоднородных плоских волн при полном отражении. Отражение от хорошо проводящей поверхности и условие Леонтовича.

## 10. Излучение заданных источников в безграничной однородной изотропной среде

- 10.1. Функция Грина и общее решение неоднородного волнового уравнения. Представление потенциалов в виде интегралов по области источников. Условие излучения.
- 10.2. Простейшая излучающая система - элементарный электрический вибратор (диполь Герца). Общее выражение для поля излучения, структура поля в квазистатической и волновой зонах. Диаграмма направленности; сопротивление излучения. Поле магнитного диполя (с использованием принципа двойственности).
- 10.3. Общее представление поля излучения произвольной системы заданных гармонических токов в дальней зоне. Вектор излучения как пространственная Фурье-гармоника плотности тока. Основные характеристики направленности излучающей системы.

## ЧАСТЬ II.

### 1. Введение

- 1.1. Диапазоны частот.
- 1.2. Электрические свойства земной поверхности.



- 1.3. Структура атмосферы и ионосферы Земли.
- 1.4. Геометрические свойства земной поверхности. Радиогоризонт.

## 2. Канал связи

- 2.1. Бюджет канала связи.
- 2.2. Характеристики канала.
- 2.3. Замирания в каналах связи.
- 2.4. Дистанционное уравнение.

## 3. Электромагнитные волны в средах

- 3.1. Уравнения Максвелла.
- 3.2. Потенциалы электромагнитного поля.
- 3.3. Плоские, цилиндрические и сферические волны.
- 3.4. Электромагнитные волны в проводящей среде.
- 3.5. Импедансы: характеристический, нормальный приведенный поверхностный.
- 3.6. Коэффициенты отражения Френеля.

## 4. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности

- 4.1. Задача Зоммерфельда. Строгая постановка задачи об излучении вертикального электрического диполя расположенного вблизи плоской поверхности Земли.
- 4.2. Отражательные формулы. Области, существенные для отражения радиоволн.
- 4.3. Формула Введенского.
- 4.4. Диаграмма направленности элементарного диполя, расположенного вблизи земной поверхности.
- 4.5. Численное расстояние. Функция ослабления. Функция ослабления для малых и больших численных расстояний.
- 4.6. Интегральное уравнение для функции ослабления. Распространение радиоволн вдоль неоднородной трассы. Береговая рефракция.
- 4.7. Влияние рельефа местности на распространение радиоволн. Отражение радиоволн от шероховатой поверхности. Критерий Релея.
- 4.8. Дифракция радиоволн на одиночном препятствии. Дифракция на крае плоского экрана. Усиление препятствием. Приближение Кирхгофа.
- 4.9. Основы геометрической теории дифракции.

## 5. Распространение радиоволн ОНЧ-диапазона в волноводе Земля-ионосфера

- 5.1. Модель плоского волновода. Решение задачи об излучении элементарного вертикального электрического диполя в плоском волноводе в интегральной форме.
- 5.2. Поле в дальней зоне волновода. Разложение по нормальным волнам плоского волновода. Уравнение полюсов. Фазовые скорости и коэффициенты затухания нормальных волн.
- 5.3. Поле в ближней зоне волновода. Разложение по лучам.

## 6. Распространение радиоволн в ионосфере

- 6.1. Поперечные электромагнитные волны в однородной изотропной плазме.
- 6.2. Нормальные волны в однородной магнитоактивной плазме.
- 6.3. Приближение геометрической оптики для слоистой изотропной плазмы. Уравнение эйконала. Траектории волн. Уравнение переноса.

- 6.4. Распространение поперечных электромагнитных волн в трехмерно-неоднородной изотропной среде. Уравнения траекторий. Уравнение переноса.
- 6.5. Распространение нормальных волн в неоднородной магнитоактивной плазме. Уравнение эйконала. Уравнения траекторий. Поляризация нормальных волн. Уравнение переноса.
- 6.6. Вертикальное зондирование ионосферы. Действующая высота отражения. Ионограмма. Наклонное зондирование ионосферы. Максимальные и минимальные наблюдаемые частоты.

## 7. Распространение радиоволн в тропосфере

- 7.1. Рефракция радиоволн. Приведенный показатель преломления и индекс рефракции. Эквивалентный радиус Земли. Рассеяние радиоволн неоднородностями тропосферы. Дальнее тропосферное распространение радиоволн.
- 7.2. Поглощение и рассеяние радиоволн гидрометеорами. Молекулярное поглощение радиоволн. Общие вопросы молекулярного поглощения. Вращательные спектры молекул. Коэффициент молекулярного поглощения. Форма спектральной линии, обусловленная молекулярными соударениями. Доплеровское уширение линий.
- 7.3. Методики расчетов ослабления радиоволн на вертикальных и наклонных трассах (большие и малые углы места). Астрономическая рефракция радиоволн. Модельные расчеты рефракции.

Практические занятия (семинарские занятия) организуются, в том числе в форме практической подготовки, которая предусматривает участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Практическая подготовка предусматривает: решение практических заданий и задач, организация семинаров по отдельным разделам дисциплины.

На проведение практических занятий (семинарских занятий) в форме практической подготовки отводится 51 час.

Практическая подготовка направлена на формирование и развитие:

- практических навыков в соответствии с профилем ОП:

- анализ научно-технической проблемы на основе подбора и изучения литературных и патентных источников;
- математическое и компьютерное моделирование радиоэлектронных устройств и систем с целью оптимизации (улучшения) их параметров;
- разработка методов приема, передачи и обработки сигналов, обеспечивающих рост технических характеристик радиоэлектронной аппаратуры.

- компетенций: ОПК-1, ОПК-7

Текущий контроль успеваемости реализуется в рамках занятий семинарского типа, групповых или индивидуальных консультаций.

#### 4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Используются следующие виды самостоятельной работы студента: в читальном зале библиотеки, в учебных кабинетах (лабораториях), компьютерных классах с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе курса и контролируется в ходе проведения лекционных и семинарских занятий, а также в процессе экзамена по данной дисциплине. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, комплекты слайдов, конспекты лекций.

Контрольные вопросы и задания для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведены в п. 5.2.

#### 5. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю),

включающий:

##### 5.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала.  Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений . Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения.  Имели место грубые ошибки.	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи . Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с	Продemonстрированы все основные умения, решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены	Продemonстрированы все основные умения,. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без

			полном объеме.	объеме, но некоторые с недочетами.	недочетами.	все задания в полном объеме.	недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки.  Имели место грубые ошибки.	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки  при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки  при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрированы навыки  при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценки при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
	<b>превосходно</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой
<b>зачтено</b>	<b>отлично</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
	<b>очень хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»
	<b>хорошо</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо»
	<b>удовлетворительно</b>	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
<b>не зачтено</b>	<b>неудовлетворительно</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
	<b>плохо</b>	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

## 5.2. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения.

### 5.2.1 Контрольные вопросы

Вопросы	Код формируемой компетенции
ЧАСТЬ I.	
Уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной формах. Уравнение непрерывности. Материальные уравнения.	ОПК-1
Принцип суперпозиции решения уравнений Максвелла. Принцип двойственности. Закон сохранения заряда.	ОПК-1
Постулаты, связывающие электромагнитные явления с механическими (плотность энергии или сила Лоренца).	ОПК-1
Граничные условия для полей (вывод из уравнений Максвелла). Понятие поверхностных зарядов и токов.	ОПК-1
Теорема Пойнтинга. Энергия электромагнитного поля. Плотность потока энергии. Джоулевы потери.	ОПК-1
Теорема единственности решения уравнений Максвелла при заданных начальных и граничных условиях.	ОПК-1
Уравнения, описывающие электростатическое поле. Скалярный потенциал. Уравнения Пуассона и Лапласа. Общее уравнение для потенциала в неоднородном диэлектрике. Граничные условия для потенциала на поверхностях диэлектриков и проводников.	ОПК-1
Теорема о минимуме и максимуме потенциала. Теорема Ирншоу. Теорема взаимности в электростатике.	ОПК-1
Прямая задача электростатики для безграничной однородной среды. Функция Грина. Общее решение уравнения Пуассона. Поле произвольного ограниченного распределения зарядов. Потенциал двойного слоя.	ОПК-1
Поле произвольной системы зарядов на большом расстоянии от нее. Разложение по мультиполям. Понятие дипольного момента.	ОПК-1
Методы решения прямой задачи при наличии проводников и диэлектриков. Конструктивные методы: металлизация эквипотенциальных поверхностей; метод изображений.	ОПК-1
Метод заполнения при решении прямой задачи электростатики.	ОПК-1
Задача о диэлектрическом шаре в однородном внешнем электрическом поле. Дипольные моменты диэлектрического и идеально проводящего шаров.	ОПК-1
Линейные соотношения между зарядами и потенциалами проводников. Потенциальные и емкостные коэффициенты.	ОПК-1
Энергия электростатического поля. Представление энергии в виде интеграла по области источников. Собственная энергия различных подсистем и энергия их взаимодействия.	ОПК-1
Энергия системы проводников. Энергия взаимодействия внешнего поля с точечным зарядом или точечным диполем. Теорема Томсона (без доказательства).	ОПК-1
Силы в электростатическом поле. Энергетический метод расчета обобщенных сил. Выражение для силы в системе проводников с постоянными зарядами или постоянными потенциалами.	ОПК-1
Сила, действующая на заряд и диполь во внешнем поле; момент сил, действующих на диполь.	ОПК-1

Плотность силы, действующей на поверхность проводника в электростатическом поле. Объемная плотность силы в диэлектрике. Случай линейной зависимости диэлектрической проницаемости от плотности вещества.	ОПК-1
Уравнения теории постоянных токов в проводящей среде. Граничные условия для плотности тока. Понятие идеального электрода и идеального изолятора. Формальная аналогия с электростатикой.	ОПК-1
Уравнения, описывающие магнитное поле постоянных токов. Векторный потенциал. Уравнения для векторного потенциала в однородной среде и его решение. Закон Био-Савара.	ОПК-1
Поле произвольной системы токов на большом расстоянии от нее. Разложение по мультиполям. Понятие магнитного дипольного момента. Поле магнитного диполя.	ОПК-1
Скалярный потенциал магнитного поля. Магнитный листок как эквивалент линейного контура с током. Аналогия между магнитостатическими и электростатическими полями как проявление принципа двойственности.	ОПК-1
Энергия и силы в магнитном поле. Представление энергии в виде интеграла по области источников. Энергия системы квазилинейных токов. Коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции.	ОПК-1
Сила, действующая на элемент квазилинейного контура с током. Сила и вращающий момент, действующие на магнитный диполь. Плотность объемной силы в магнитном поле.	ОПК-1
Описание переменного электромагнитного поля в общем случае. Дифференциальные уравнения второго порядка для электрического и магнитного полей.	ОПК-7
Описание переменного электромагнитного поля с помощью скалярного и векторного потенциалов. Градиентная инвариантность. Условие калибровки Лоренца.	ОПК-7
Волновые уравнения для потенциалов. Вектор Герца. Магнитные потенциалы.	ОПК-7
Гармонические процессы. Комплексная запись полей и уравнений Максвелла. Комплексная диэлектрическая проницаемость. Связь комплексных полей с потенциалами.	ОПК-7
Комплексная теорема Пойнтинга.	ОПК-7
Теорема единственности решения уравнений Максвелла для гармонических полей.	ОПК-7
Квазистационарные процессы в проводящих средах. Распределение переменных полей и токов в проводящем полупространстве. Скин-эффект.	ОПК-7
Граничные условия Леонтовича. Энергетические соотношения при скин-эффекте.	ОПК-7
Квазистационарные процессы в квазилинейных цепях с сосредоточенными параметрами. Возможность пренебрежения запаздыванием передачи взаимодействия и выделение зоны квазистатики.	ОПК-7
Законы Кирхгофа для цепей с переменными токами.	ОПК-7
Однородные плоские волны в непоглощающей изотропной среде. Дисперсионное соотношение. Поляризация волны, длина волны, фазовая скорость, характеристический импеданс, плотность потока энергии.	ОПК-7
Неоднородные плоские волны в непоглощающей изотропной среде (волны с комплексным волновым вектором). Дисперсионное соотношение. Поляризация волны, длина волны, фазовая скорость, поперечный	ОПК-7

характеристический импеданс, плотность потока энергии.	
Плоские волны в поглощающей изотропной среде. Выражение для комплексного волнового числа при наличии поглощения.	ОПК-7
Неоднородная плоская волна как суперпозиция двух однородных плоских волн. Поляризация поля, длина волны, фазовая скорость, поперечный характеристический импеданс, плотность потока энергии.	ОПК-7
Конструирование поля в волноводе из однородных плоских волн (на примере волн типа ТЕ прямоугольного волновода).	ОПК-7
Изотропные среды с временной дисперсией. Связь между индукцией и напряженностью поля. Мощность джоулевых потерь в среде с временной дисперсией.	ОПК-7
Квазимонохроматические процессы. Энергия поля в среде с временной дисперсией.	ОПК-7
Распространение импульсного сигнала в среде с временной дисперсией. Групповая скорость.	ОПК-7
Диффузионное уравнение для огибающей импульса в среде с временной дисперсией. Расплывание импульса при распространении.	ОПК-7
Нормальное падение плоской волны на плоскую границу раздела двух сред. Выражения для коэффициентов отражения и прохождения.	ОПК-7
Формула пересчета импеданса. Коэффициент отражения от плоскопараллельной пластины.	ОПК-7
Законы отражения и преломления плоских волн на плоской границе раздела двух однородных сред (закон Снелля).	ОПК-7
Наклонное падение плоских волн на плоскую границу раздела двух сред. Выражения коэффициентов отражения и прохождения через поперечные волновые импедансы (формулы Френеля).	ОПК-7
Эффект Брюстера. Угол Брюстера.	ОПК-7
Полное внутреннее отражение. Возникновение неоднородных плоских волн при полном отражении.	ОПК-7
Функция Грина неоднородного волнового уравнения при произвольной зависимости от времени.	ОПК-7
Функция Грина и общее решение неоднородного волнового уравнения при гармонической зависимости от времени. Представление векторного потенциала в виде интеграла по области источников. Условие излучения.	ОПК-7
Общее решение неоднородного волнового уравнения при произвольной зависимости от времени. Представление потенциалов в виде интегралов по области источников.	ОПК-7
Элементарный электрический вибратор (диполь Герца). Общее выражение для поля излучения. Структура поля в квазистатической и волновой зонах.	ОПК-7
Диаграмма направленности излучения по мощности. Сопротивление излучения. Выражения для диаграммы направленности, полной мощности излучения и сопротивления излучения элементарного электрического вибратора.	ОПК-7
Элементарный магнитный диполь. Структура поля в волновой зоне, диаграмма направленности и полная мощность излучения. Сопротивление излучения кругового витка малых электрических размеров.	ОПК-7
Общее представление поля излучения произвольной системы заданных гармонических токов в дальней зоне. Вектор излучения.	ОПК-7
Основные характеристики направленности излучающей системы (диаграмма направленности, коэффициент направленного действия). Общее выражение для диаграммы направленности излучения произвольной	ОПК-7

системы гармонических токов.	
ЧАСТЬ II.	
1. Электрические свойства почвы. Комплексная диэлектрическая проницаемость.	ОПК-7
2. Характеристический импеданс. Приведенный поверхностный импеданс.	ОПК-7
3. Коэффициенты отражения Френеля для ТМ- и ТЕ-волн.	ОПК-7
4. Излучение вертикального электрического диполя, расположенного вблизи плоской поверхности Земли. Постановка задачи и решение в интегральной форме.	ОПК-7
5. Области, существенные для распространения и отражения радиоволн.	ОПК-7
6. Отражательные формулы.	ОПК-7
7. Формула Введенского.	ОПК-7
8. Функция ослабления (определение, интегральное уравнение для функции ослабления).	ОПК-7
9. Численное расстояние. Функция ослабления для малых и больших численных расстояний.	ОПК-7
10. Отражение радиоволн от шероховатой поверхности. Критерий Релея.	ОПК-7
11. Дифракция радиоволн на крае плоского экрана. Приближение Кирхгофа.	ОПК-7
12. Дифракция радиоволн на одиночном препятствии. Усиление препятствием.	ОПК-7
13. Основы геометрической теории дифракции.	ОПК-7
14. Распространение радиоволн ОНЧ-диапазона в волноводе Земля-ионосфера. Постановка задачи. Решение в интегральной форме.	ОПК-7
15. Распространение радиоволн ОНЧ-диапазона в волноводе Земля-ионосфера. Поле в дальней зоне.	ОПК-7
16. Распространение радиоволн ОНЧ-диапазона в волноводе Земля-ионосфера. Поле в ближней зоне.	ОПК-7
17. Дисперсионное уравнение для поперечных волн в холодной изотропной плазме.	ОПК-7
18. Характеристики нормальных волн в однородной магнитоактивной плазме.	ОПК-7
19. Приближение геометрической оптики для поперечных электромагнитных волн в неоднородной изотропной плазме. Уравнение эйконала. Уравнения лучей.	ОПК-7
20. Приближение геометрической оптики для поперечных электромагнитных волн в неоднородной изотропной плазме. Уравнение переноса.	ОПК-7
21. Лучевое приближение для нормальных волн в неоднородной магнитоактивной плазме. Уравнение эйконала. Уравнения лучей. Поляризация нормальных волн.	ОПК-7
22. Лучевое приближение для нормальных волн в неоднородной магнитоактивной плазме. Уравнение переноса.	ОПК-7
23. Линейная трансформация нормальных волн.	ОПК-7
24. Рефракция радиоволн в тропосфере. Приведенный показатель преломления и индекс рефракции.	ОПК-7



25. Рассеяние радиоволн неоднородностями в тропосфере.	ОПК-7
26. Поглощение и рассеяние радиоволн гидрометеорами.	ОПК-7
27. Молекулярное поглощение радиоволн.	ОПК-7

### 5.2.2. Типовые задания/задачи для оценки сформированности компетенции ОПК-1

Заряд  $q$  распределен равномерно по длине окружности радиуса  $a$ , лежащей на плоскости  $xy$ . Центр окружности совпадает с началом координат. Найти потенциал  $\varphi(z)$  и электрическое поле  $E_z(z)$  на оси  $z$ . Определить, в какой точке на оси поле имеет максимум и найти значения поля и потенциала в этой точке.

### 5.2.3. Типовые задания/задачи для оценки сформированности компетенции ОПК-7

Записать выражения для проекций электрического и магнитного полей в виде явных зависимостей от координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и времени  $t$  для плоской волны  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r})}$ , у которой векторы  $\mathbf{E}_0$  и  $\mathbf{k}$  лежат в плоскости  $(x, z)$ , и задан угол  $\alpha$  между  $\mathbf{z}_0$  и  $\mathbf{k}$ .

Рассчитать зависимость действующей высоты отражения радиоволны в ионосфере от частоты в предположении, что электронная концентрация в ионосфере изменяется с высотой  $z$  по закону  $N(z) = N_0(z - h_0)/L$  где  $h_0$  – высота нижней границы ионосферы,  $L$  – характерный масштаб неоднородности, а частота волны удовлетворяет условию  $\omega \gg \omega_B$ ,  $\omega_B$  – гирочастота электронов.

## 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Никольский В. В., Никольская Т. И. - Электродинамика и распространение радиоволн: [учеб. пособие для радиотехн. специальностей вузов]. - М.: Наука, 1989. - 543 с.
2. Вайнштейн Л. А. - Электромагнитные волны. - М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.
3. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Т.8 Электродинамика сплошных сред. [Электронный ресурс] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — Электрон. дан. — М. : Физматлит, 2005. — 656 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/2234> — Загл. с экрана.
4. Баскаков С. И. - Основы электродинамики: [учеб. пособие для радиотехн. специальностей вузов]. - М.: Советское радио, 1973. - 248 с.
5. Гольдштейн Л. Д., Зернов Н. В. - Электромагнитные поля и волны. - М.: Советское радио, 1971. - 662 с.
6. Тамм, И.Е. Основы теории электричества. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — М. : Физматлит, 2003. — 616 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/2333> — Загл. с экрана.
7. Гильденбург, В.Б. Сборник задач по электродинамике. [Электронный ресурс] / В.Б.

Гильденбург, М.А. Миллер. — Электрон. дан. — М. : Физматлит, 2001. — 163 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/48209> — Загл. с экрана.

8. Фейнберг Е. Л. - Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. - М.: Наука : Физматлит, 1999. - 496 с.
9. Черенкова Е. Л., Чернышев О. В. - Распространение радиоволн: учеб. для вузов по специальности "Радиосвязь и радиовещание". - М.: Радио и связь, 1984. - 272 с.
10. Грудинская Г. П. - Распространение радиоволн: [учеб. пособие для радиотехн. вузов и фак.]. - М.: Высшая школа, 1967. - 244 с.
11. Распространение радиоволн: [учебник]/Яковлев О. И., Якубов В. П., Урядов В. П., Павельев А. Г. - М.: ЛЕНАНД, 2009. - 496 с.
12. Альперт Я. Л. - Распространение электромагнитных волн и ионосфера. - М.: Наука, 1972. - 563 с.
13. Гинзбург В. Л. - Распространение электромагнитных волн в плазме. - М.: Наука, 1967. - 683 с.
14. Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. - Волновые явления в ионосфере и космической плазме. - М.: Наука, 1984. - 392 с.
15. Железняков В. В. - Электромагнитные волны в космической плазме: Генерация и распространение. - М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1977. - 432 с.
16. Дэвис К. - Радиоволны в ионосфере. - М. : Мир, 1973. - 502 с.
17. Колосов М. А., Арманд Н. А., Яковлев О. И. - Распространение радиоволн при космической связи. - М. : Связь, 1969. - 155 с.

б) дополнительная литература:

1. Джексон Д. - Классическая электродинамика. - М.: Мир, 1965. - 702 с.
2. Пановский В., Филипс М - Классическая электродинамика. - М.: Физматгиз, 1963. - 432 с.
3. Батыгин, В.В. Сборник задач по электродинамике и специальной теории относительности. [Электронный ресурс] / В.В. Батыгин, И.Н. Топтыгин. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2010. — 480 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/544> — Загл. с экрана.
4. Терлецкий Я. П., Рыбаков Ю. П. - Электродинамика: [учеб. пособие для физ. специальностей ун-тов]. - М.: Высшая школа, 1990. - 351, [1] с.
5. Кашпровский В. Е., Кузубов Ф. А. - Распространение средних радиоволн земным лучом. - М. : Связь, 1971. - 220 с.
6. Колосов М. А., Шабельников А. В. - Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. - М.: Советское радио, 1976. - 220 с.

## **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими

средствами обучения: наборы демонстрационного оборудования и учебно-наглядных пособий, обеспечивающие тематические иллюстрации, соответствующие программе дисциплины.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки (специальности) 11.05.02 «Специальные радиотехнические системы» и уровню высшего образования Специалитет (утвержден приказом Минобрнауки России от 09.02.2018 № 95).

Авторы: к.ф.-м.н. В.А. Еськин, к.ф.-м.н., доцент В.А. Яшнов

Рецензент: д.т.н., доцент Е.С. Фитасов

Заведующий кафедрой: д.ф.-м.н., профессор Кудрин А.В.

Заведующий кафедрой распространения  
радиоволн и радиоастрономии: д.т.н., снс А.В. Калинин

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета от «09» декабря 2021 года, протокол № 07/21.