

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)

Институт информационных технологий и радиоэлектроники

УТВЕРЖДАЮ:

Директор института

  
Галкин А.А.  
« 06 » 2021 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

Радиофизика электронных колебаний

**направление подготовки / специальность**

11.03.01 Радиотехника

**направленность (профиль) подготовки**

Электронные цифровые устройства и системы

г. Владимир

Год 2021

## 1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения дисциплины Радиофизика электронных колебаний является усвоение основных положений теории электромагнитного поля, формирование навыков анализа волновых процессов, включая элементы теории дифракции и излучения.

Задачи: подготовка в области теории электромагнитного поля для профессиональной деятельности специалиста: научно-исследовательской, проектной.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина Физика радиоволн относится к части, формируемая участниками образовательных отношений.

## 3. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОПОП (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине, в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	
УК-1. Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач.	<p>УК-1.1. Знает принципы сбора и обобщения информации.</p> <p>УК-1.2. Умеет соотнести разнородные явления и систематизировать их в рамках избранных видов профессиональной деятельности.</p> <p>УК-1.3. Владеет навыками научного поиска и практической работы с информационными источниками; методами принятия решений.</p>	<p>Знает основные уравнения, принципы и теоремы классической теории электромагнитного поля; свойства электромагнитных волн в свободном пространстве и закономерности их рассеяния на границе раздела сред и телах сложной формы, основные положения теории излучения.</p> <p>Умеет применять основные уравнения, принципы и теоремы классической теории электромагнитного поля для анализа волновых процессов в свободном пространстве и на границе раздела сред с различными электродинамическими параметрами, на телах различной формы, при возбуждении волн в свободном пространстве.</p> <p>Владеет методами анализа, принципами и тео-</p>	<p>Опрос по пройденному теоретическому материалу.</p> <p>Тестовые вопросы.</p>

		ремами классической теории электромагнитного поля при рассмотрении волновых процессов в свободном пространстве, на границе раздела сред, при рассеянии электромагнитных волн на телах сложной формы, возбуждении волн в свободном пространстве.	
ПК-3. Способен реализовать программы экспериментальных исследований, включая выбор технических средств и обработку результатов.	<p>ПК-3.1. Знает принципы работы, устройство, технические возможности контрольно-измерительного и диагностического оборудования.</p> <p>ПК-3.2. Умеет использовать оборудование для диагностирования и устранения неисправностей, возникших при эксплуатации сложных функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры.</p> <p>ПК-3.3. Владеет навыками устранения неисправностей, приводящих к возникновению неработоспособного состояния сложных функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры.</p>	<p>Знает способы реализации программ экспериментальных исследований волновых процессов с использованием технических средств и средства обработки результатов.</p> <p>Умеет реализовывать программы экспериментальных исследований волновых процессов с использованием современных технических средств и средств обработки результатов.</p> <p>Владеет способами реализации программ экспериментальных исследований волновых процессов, включая технические средства и средства обработки результатов.</p>	Лабораторные работы с физическим и виртуальным оборудованием. Отчет по практической подготовке.

#### 4. ОБЪЕМ И СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Трудоемкость дисциплины составляет 5 зачетных единиц, 180 часов.

##### Тематический план форма обучения – очная

№ п/п	Наименование тем и/или разделов/тем дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Контактная работа обучающихся с педагогическим работником	Самостоятельно	Формы текущего контроля успеваемости,
-------	--	---------	-----------------	---	----------------	---------------------------------------

				Лекции	Практические занятия <sup>1</sup>	Лабораторные работы	в форме практической подготовки <sup>2</sup>		форма промежуточной аттестации (по семестрам)
1	Введение. Электромагнитное поле и параметры сред	3	1	1	2		1	4	
2	Основные уравнения электродинамики	3	2	1	2		1	4	
3	Граничные условия	3	3	1	2		1	4	
4	Энергия электромагнитного поля	3	4	1	2		1	4	
5	Методы решения уравнений Максвелла для гармонического поля	3	5	1	2		1	4	
6	Плоские электромагнитные волны в однородной изотропной среде	3	6	1	2	4	1	4	Рейтинг-контроль 1
		3	7	1	2	4	1	4	
7	Волновые явления на границе раздела двух сред	3	8	1	2	6	1	4	
		3	9	1	2		1	4	
		3	10	1	2		1	5	
		3	11	1	2		1	5	
8	Поверхностный эффект	3	12	1	2		1	5	Рейтинг-контроль 2
9	Элементарные излучатели	3	13	1	2	4	1	5	
		3	14	1	2		1	5	
10	Основные теоремы электродинамики	3	15	1	2		1	5	
		3	16	1	2		1	5	
11	Основы теории дифракции электромагнитных волн	3	17	1	2		1	5	
		3	18	1	2		1	5	Рейтинг-контроль 3
Всего за 3 семестр:				18	36	18		81	Экзамен (27)
Наличие в дисциплине КП/КР					-				
Итого по дисциплине				18	36	18		81	Экзамен (27)

### Содержание лекционных занятий по дисциплине

Раздел 1. Введение. Электромагнитное поле и параметры сред.

Тема 1. Общие сведения.

Классическая теория электромагнитного поля. Электрическое и магнитное поле.

Тема 2. Векторы электромагнитного поля.

Векторы электрического поля. Векторы магнитного поля.

Тема 3. Классификация сред.

Среды линейные и нелинейные, однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные.

Тема 4. Графическое изображение полей.

Силовые линии поля. Дифференциальное уравнение силовой линии.

Тема 5. Потенциальные и вихревые поля.

Определение и свойства потенциальных и вихревых полей.

Раздел 2. Основные уравнения электродинамики.

Тема 1. Общие сведения.

Объемная, поверхностная и линейная плотности электрического заряда. Векторы объемной, поверхностной и линейной плотности электрического тока. Сила тока.

Тема 2. Уравнение непрерывности.

Интегральная и дифференциальная формы уравнения непрерывности. Уравнение непрерывности для стационарного процесса.

Тема 3. Закон сохранения заряда.

Закон сохранения заряда и его взаимосвязь с уравнением непрерывности.

Тема 4. Третье уравнение Максвелла.

Обобщение закона Гаусса на случай переменных процессов. Истоки (стоки) векторов  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$ .

Тема 5. Четвертое уравнение Максвелла.

Закон Гаусса для магнитного поля и его дифференциальная форма.

Тема 6. Первое уравнение Максвелла.

Дифференциальная форма закона полного тока для стационарного и нестационарного процессов.

Первое положение Максвелла.

Тема 7. Второе уравнение Максвелла.

Выражение обобщенного закона электромагнитной индукции через векторы электромагнитного поля. Второе положение Максвелла.

Тема 8. Закон Ома в дифференциальной форме.

Переход от обычного закона Ома к его дифференциальной форме: зависимости объемной плотности тока проводимости в точке проводящей среды от напряженности электрического поля.

Тема 9. Уточнение понятия о проводниках и диэлектриках.

Идеальный проводник и диэлектрик. Критерий деления сред на проводники и диэлектрики. Особенность проводящих сред.

Тема 10. Полная система уравнений Максвелла.

Система уравнений электродинамики. Материальные уравнения. Выводы относительно свойств электромагнитного поля. Принцип суперпозиции для электромагнитного поля. Уравнения Максвелла в интегральной форме.

Тема 11. Классификация электромагнитных явлений.

Электростатические и магнитостатические явления, стационарное электромагнитное поле, квазистационарные процессы.

Тема 12. Уравнения Максвелла и сторонние токи.

Сторонние электрические токи, сторонняя напряженность электрического поля, сторонние электрические заряды.

Раздел 3. Граничные условия.

Тема 1. Общие сведения.

Неприменимость уравнений Максвелла в дифференциальной форме на границе раздела двух сред.

Тема 2. Граничные условия для векторов электрического поля.

Условия для нормальных составляющих векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{D}$ . Поверхностные заряды. Условия для касательных составляющих векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{D}$ .

Тема 3. Граничные условия для векторов магнитного поля.

Условия для нормальных составляющих векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ . Условия для касательных составляющих векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ . Поверхностный ток.

Тема 4. Полная система граничных условий.

Полная система граничных условий в скалярной и векторной форме. Граничные условия на поверхности идеального проводника.

Раздел 4. Энергия электромагнитного поля.

Тема 1. Баланс энергии электромагнитного поля.

Качественное уравнение баланса мгновенных значений мощности для ограниченного объема и его количественное выражение через векторы электромагнитного поля. Теорема Пойнтинга.

Тема 2. Плотность энергии электромагнитного поля.

Объемная плотность энергии электрического и магнитного полей. Суммарная и взаимная энергия полей. Дифференциальная форма теоремы Пойнтинга.

Тема 3. Скорость распространения электромагнитной энергии.

Энергетическая трубка. Скорость распространения энергии при неравномерном и равномерном распределении векторов поля в поперечном сечении энергетической трубки.

Тема 4. Уравнения Максвелла для монохроматического поля.

Метод комплексных амплитуд. Система уравнений монохроматического поля.

Тема 5. Уравнение баланса для средней за период мощности.

Среднее за период значение функции. Комплексный вектор Пойнтинга. Средние за период значения: потока мощности, мощности джоулевых потерь, мощности сторонних источников, электрической и магнитной энергий, изменение электромагнитной энергии.

Тема 6. Уравнение баланса для комплексной мощности.

Вывод уравнения баланса для комплексной мощности. Уравнение баланса для активной и реактивной мощностей. Уравнение баланса для изолированной системы.

Тема 7. Теорема единственности для внутренних и внешних задач электродинамики.

Единственность решения внутренних задач электродинамики. Единственность решения внешних задач электродинамики.

Раздел 5. Методы решения уравнений Максвелла для гармонического поля.

Тема 1. Уравнения Гельмгольца.

Прямая и обратная задачи электродинамики. Уравнения Гельмгольца для векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ . Однородные уравнения Гельмгольца для векторов электромагнитного поля.

Тема 2. Электродинамические потенциалы гармонического электромагнитного поля.

Векторный электрический потенциал. Скалярный электрический потенциал. Условие калибровки потенциалов. Уравнения Гельмгольца для электродинамических потенциалов.

Тема 3. Решение неоднородных уравнений Гельмгольца.

Решение неоднородных уравнений Гельмгольца для сторонних источников, распределенных по объему, по поверхности, по контуру.

Тема 4. Уравнения Максвелла с учетом магнитных токов и зарядов.

Магнитные токи и заряды. Уравнения Максвелла для магнитных сторонних источников. Принцип перестановочной двойственности. Решение неоднородных уравнений Гельмгольца для маг-

нитных источников.

Раздел 6. Плоские электромагнитные волны в однородной изотропной среде.

Тема 1. Плоские электромагнитные волны в однородной изотропной среде без потерь.

Решение однородного уравнения Гельмгольца относительно составляющих поля плоской волны.

Характеристики плоской волны в среде без потерь.

Тема 2. Плоские электромагнитные волны в однородной изотропной среде с проводимостью отличной от нуля.

Комплексная постоянная распространения и ее связь с электродинамическими параметрами среды.

Характеристики плоской волны в среде с потерями. Дисперсия.

Тема 3. Распространение плоских волн в реальных диэлектриках и проводниках.

Сравнительная оценка параметров плоской волны в средах без потерь, реальных диэлектриках и проводниках.

Тема 4. Поляризация волн.

Плоскость поляризации. Линейно поляризованные волны, волны с круговой и эллиптической поляризацией.

Раздел 7. Волновые явления на границе раздела двух сред.

Тема 1. Плоские волны, распространяющиеся в произвольном направлении.

Направляющие косинусы. Поле плоской однородной волны в системе координат с осями не совпадающими с направлением распространения волны.

Тема 2. Падение плоской волны на границу раздела двух диэлектриков. Нормальная поляризация. Параллельная поляризация.

Составляющие поля падающей, отраженной и преломленной волн. Граничная задача на поверхности раздела сред. Законы Снеллиуса. Коэффициенты Френеля. Результирующее поле в первой и второй средах.

Тема 3. Условие полного прохождения волны во вторую среду. Угол Брюстера.

Случай параллельной поляризации. Случай нормальной поляризации.

Тема 4. Полное отражение от границы раздела двух сред. Две диэлектрические среды.

Условия полного внутреннего отражения. Выражения для составляющих результирующего поля в первой среде и их анализ. Выражения для составляющих результирующего поля во второй среде и их анализ.

Тема 5. Полное отражение от границы раздела двух сред. Диэлектрик – идеальный проводник.

Анализ волнового процесса на границе раздела диэлектрик – идеальный проводник. Характерные результаты.

Тема 6. Падение плоской волны на границу поглощающей среды. Приближенные граничные условия Щукина – Леонтовича.

Действительный угол преломления. Характеристики преломленной волны в поглощающей среде.

Падение плоской волны на поверхность реального проводника. Граничные условия Щукина – Леонтовича и их приближенность.

Раздел 8. Поверхностный эффект.

Тема 1. Явление поверхностного эффекта.

Распределение амплитуды поля и тока внутри металла при удалении от ограничивающей поверхности. Активное сопротивление и защитные свойства металлических экранов при переменном электромагнитном поле.

Тема 2. Потери энергии в проводниках.

Вычисление потока комплексного вектора Пойнтинга, направленного внутрь проводящего тела,

на основе приближенного граничного условия Щукина – Леонтовича.

Тема 3. Эквивалентный поверхностный ток.

Упрощение электродинамических задач заменой реального распределения тока эквивалентным поверхностным.

Тема 4. Поверхностное сопротивление.

Связь тангенциальными составляющими векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{j}^{\text{э}}$  на поверхности проводника.

Комплексное поверхностное сопротивление.

Раздел 9. Элементарные излучатели.

Тема 1. Элементарный электрический излучатель.

Определение и общие свойства элементарного электрического излучателя.

Тема 2. Векторный электрический потенциал и составляющие поля элементарного электрического излучателя.

Адаптация общего решения векторного электрического потенциала для элементарного электрического излучателя и его проекции в сферической системе координат. Составляющие поля элементарного электрического излучателя.

Тема 3. Ближняя и дальняя зоны, диаграмма направленности элементарного электрического излучателя.

Определение ближней и дальней зон. Свойства полей в ближней и дальней зонах. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя. Мощность и сопротивление излучения.

Тема 4. Элементарный щелевой излучатель.

Понятие о магнитном токе. Составляющие поля элементарного магнитного излучателя в дальней зоне. Мощность и сопротивление излучения. Другие типы элементарного магнитного излучателя.

Раздел 10. Основные теоремы электродинамики.

Тема 1. Лемма Лоренца.

Определение соотношения, устанавливающего связь между разнесенными в пространстве сторонними источниками и возбуждаемыми ими полями в ограниченном и бесконечном объемах.

Тема 2. Теорема взаимности для элементарных излучателей.

Применение леммы Лоренца для получения соотношения, связывающего собственные и взаимные параметры разнесенных в пространстве элементарных излучателей.

Тема 3. Эквивалентные источники электромагнитного поля.

Фиктивные источники. Принцип эквивалентности. Принцип Гюйгенса – Кирхгофа.

Тема 4. Элемент Гюйгенса.

Электродинамическая модель элемента Гюйгенса. Составляющие поля элемента Гюйгенса в дальней зоне. Диаграмма направленности элемента Гюйгенса.

Раздел 11. Основы теории дифракции электромагнитных волн.

Тема 1. Строгая постановка задачи дифракции.

Описание процесса дифракции. Формулировка задачи дифракции.

Тема 2. Решение задачи дифракции плоской волны на идеально проводящем бесконечном. Круговом цилиндре. Анализ решения.

Тема 3. Приближенные методы решения задач дифракции.

Приближение Гюйгенса – Кирхгофа. Геометрическая оптика. Метод краевых волн. Геометрическая теория дифракции.



Раздел 6. Плоские электромагнитные волны в однородной изотропной среде.

Тема 1. Плоские электромагнитные волны в однородной изотропной среде без потерь.

Характеристики плоской волны в среде без потерь.

Тема 2. Плоские электромагнитные волны в однородной изотропной среде с проводимостью отличной от нуля.

Характеристики плоской волны в среде с потерями.

Тема 3. Распространение плоских волн в реальных диэлектриках и проводниках.

Исследование плоской электромагнитной волны и ее характеристик в зависимости от параметров среды и частоты.

Тема 4. Поляризация волн.

Изучение поляризации электромагнитной волны и исследование различных видов поляризации.

Раздел 7. Волновые явления на границе раздела двух сред.

Тема 2. Падение плоской волны на границу раздела двух диэлектриков. Нормальная поляризация.

Параллельная поляризация.

Измерение амплитуды составляющих поля падающей, отраженной и преломленной волн.

Вычисление коэффициентов Френеля. Анализ результирующего поля в первой и второй средах.

Тема 3. Условие полного прохождения волны во вторую среду. Угол Брюстера.

Исследование явлений, возникающих при падении электромагнитной волны на плоскую границу раздела двух диэлектрических сред при  $\varphi = \varphi_B$ .

Тема 4. Полное отражение от границы раздела двух сред. Две диэлектрические среды.

Исследование явлений, возникающих при падении электромагнитной волны на плоскую границу раздела двух диэлектрических сред при  $\varphi > \varphi_{кр}$  и при  $n_1 < n_2$ .

Раздел 9. Элементарные излучатели.

Тема 3. Ближняя и дальняя зоны, диаграмма направленности элементарного электрического излучателя.

Исследование свойства поля в ближней и дальней зонах. Измерение диаграммы направленности элементарного электрического излучателя. Мощность и сопротивление излучения.

Тема 4. Элементарный щелевой излучатель.

Определение составляющих поля элементарного магнитного излучателя в дальней зоне.

Измерение диаграммы направленности элементарного магнитного излучателя. Мощность и сопротивление излучения.

### Содержание практических занятий по дисциплине

Раздел 1. Электромагнитное поле и параметры сред.

Тема 2. Векторы электромагнитного поля.

Векторы электрического поля. Векторы магнитного поля.

Тема 3. Классификация сред.

Среды линейные и нелинейные, однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные.

Тема 4. Графическое изображение полей.

Силовые линии поля. Дифференциальное уравнение силовой линии.

Тема 5. Потенциальные и вихревые поля.

Определение и свойства потенциальных и вихревых полей.

Раздел 2. Основные уравнения электродинамики.

Тема 2. Уравнение непрерывности.

Интегральная и дифференциальная формы уравнения непрерывности. Уравнение непрерывности для стационарного процесса.

Тема 3. Закон сохранения заряда.

Закон сохранения заряда и его взаимосвязь с уравнением непрерывности.

Тема 4. Третье уравнение Максвелла.

Обобщение закона Гаусса на случай переменных процессов. Истоки (стоки) векторов  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$ .

Тема 5. Четвертое уравнение Максвелла.

Закон Гаусса для магнитного поля и его дифференциальная форма.

Тема 6. Первое уравнение Максвелла.

Дифференциальная форма закона полного тока для стационарного и нестационарного процессов.

Первое положение Максвелла.

Тема 7. Второе уравнение Максвелла.

Выражение обобщенного закона электромагнитной индукции через векторы электромагнитного поля. Второе положение Максвелла.

Тема 8. Закон Ома в дифференциальной форме.

Переход от обычного закона Ома к его дифференциальной форме: зависимости объемной плотности тока проводимости в точке проводящей среды от напряженности электрического поля.

Тема 9. Уточнение понятия о проводниках и диэлектриках.

Идеальный проводник и диэлектрик. Критерий деления сред на проводники и диэлектрики. Особенности проводящих сред.

Тема 10. Полная система уравнений Максвелла.

Система уравнений электродинамики. Материальные уравнения. Выводы относительно свойств электромагнитного поля. Принцип суперпозиции для электромагнитного поля. Уравнения Максвелла в интегральной форме.

Тема 12. Уравнения Максвелла и сторонние токи.

Сторонние электрические токи, сторонняя напряженность электрического поля, сторонние электрические заряды.

Раздел 3. Граничные условия.

Тема 2. Граничные условия для векторов электрического поля.

Условия для нормальных составляющих векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{D}$ . Поверхностные заряды. Условия для касательных составляющих векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{D}$ .

Тема 3. Граничные условия для векторов магнитного поля.

Условия для нормальных составляющих векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ . Условия для касательных составляющих векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$ . Поверхностный ток.

Тема 4. Полная система граничных условий.

Полная система граничных условий в скалярной и векторной форме. Граничные условия на поверхности идеального проводника.

Раздел 4. Энергия электромагнитного поля.

Тема 1. Баланс энергии электромагнитного поля.

Качественное уравнение баланса мгновенных значений мощности для ограниченного объема и его количественное выражение через векторы электромагнитного поля. Теорема Пойнтинга.

Тема 2. Плотность энергии электромагнитного поля.

Объемная плотность энергии электрического и магнитного полей. Суммарная и взаимная энергия полей. Дифференциальная форма теоремы Пойнтинга.

Тема 3. Скорость распространения электромагнитной энергии.

Энергетическая трубка. Скорость распространения энергии при неравномерном и равномерном распределении векторов поля в поперечном сечении энергетической трубки.

Тема 4. Уравнения Максвелла для монохроматического поля.

Метод комплексных амплитуд. Система уравнений монохроматического поля.

Тема 5. Уравнение баланса для средней за период мощности.

Среднее за период значение функции. Комплексный вектор Пойнтинга. Средние за период значения: потока мощности, мощности джоулевых потерь, мощности сторонних источников, электрической и магнитной энергий, изменение электромагнитной энергии.

Тема 6. Уравнение баланса для комплексной мощности.

Вывод уравнения баланса для комплексной мощности. Уравнение баланса для активной и реактивной мощностей. Уравнение баланса для изолированной системы.

Тема 7. Теорема единственности для внутренних и внешних задач электродинамики.

Единственность решения внутренних задач электродинамики. Единственность решения внешних задач электродинамики.

Раздел 5. Методы решения уравнений Максвелла для гармонического поля.

Тема 1. Уравнения Гельмгольца.

Прямая и обратная задачи электродинамики. Уравнения Гельмгольца для векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ . Однородные уравнения Гельмгольца для векторов электромагнитного поля.

Тема 2. Электродинамические потенциалы гармонического электромагнитного поля.

Векторный электрический потенциал. Скалярный электрический потенциал. Условие калибровки потенциалов. Уравнения Гельмгольца для электродинамических потенциалов.

Тема 3. Решение неоднородных уравнений Гельмгольца.

Решение неоднородных уравнений Гельмгольца для сторонних источников, распределенных по объему, по поверхности, по контуру.

Тема 4. Уравнения Максвелла с учетом магнитных токов и зарядов.

Магнитные токи и заряды. Уравнения Максвелла для магнитных сторонних источников. Принцип перестановочной двойственности. Решение неоднородных уравнений Гельмгольца для магнитных источников.

Раздел 6. Плоские электромагнитные волны в однородной изотропной среде.

Тема 1. Плоские электромагнитные волны в однородной изотропной среде без потерь.

Решение однородного уравнения Гельмгольца относительно составляющих поля плоской волны. Характеристики плоской волны в среде без потерь.

Тема 2. Плоские электромагнитные волны в однородной изотропной среде с проводимостью отличной от нуля.

Комплексная постоянная распространения и ее связь с электродинамическими параметрами среды. Характеристики плоской волны в среде с потерями. Дисперсия.

Тема 3. Распространение плоских волн в реальных диэлектриках и проводниках.

Сравнительная оценка параметров плоской волны в средах без потерь, реальных диэлектриках и проводниках.

Тема 4. Поляризация волн.

Плоскость поляризации. Линейно поляризованные волны, волны с круговой и эллиптической

поляризации.

Раздел 7. Волновые явления на границе раздела двух сред.

Тема 1. Плоские волны, распространяющиеся в произвольном направлении.

Направляющие косинусы. Поле плоской однородной волны в системе координат с осями не совпадающими с направлением распространения волны.

Тема 2. Падение плоской волны на границу раздела двух диэлектриков. Нормальная поляризация. Параллельная поляризация.

Составляющие поля падающей, отраженной и преломленной волн. Граничная задача на поверхности раздела сред. Законы Снеллиуса. Коэффициенты Френеля. Результирующее поле в первой и второй средах.

Тема 3. Условие полного прохождения волны во вторую среду. Угол Брюстера.

Случай параллельной поляризации. Случай нормальной поляризации.

Тема 4. Полное отражение от границы раздела двух сред. Две диэлектрические среды.

Условия полного внутреннего отражения. Выражения для составляющих результирующего поля в первой среде и их анализ. Выражения для составляющих результирующего поля во второй среде и их анализ.

Тема 5. Полное отражение от границы раздела двух сред. Диэлектрик – идеальный проводник.

Анализ волнового процесса на границе раздела диэлектрик – идеальный проводник. Характерные результаты.

Тема 6. Падение плоской волны на границу поглощающей среды. Приближенные граничные условия Щукина – Леонтовича.

Действительный угол преломления. Характеристики преломленной волны в поглощающей среде.

Падение плоской волны на поверхность реального проводника. Граничные условия Щукина – Леонтовича и их приближенность.

Раздел 8. Поверхностный эффект.

Тема 1. Явление поверхностного эффекта.

Распределение амплитуды поля и тока внутри металла при удалении от ограничивающей поверхности. Активное сопротивление и защитные свойства металлических экранов при переменном электромагнитном поле.

Тема 2. Потери энергии в проводниках.

Вычисление потока комплексного вектора Пойнтинга, направленного внутрь проводящего тела, на основе приближенного граничного условия Щукина – Леонтовича.

Тема 3. Эквивалентный поверхностный ток.

Упрощение электродинамических задач заменой реального распределения тока эквивалентным поверхностным.

Тема 4. Поверхностное сопротивление.

Связь тангенциальных составляющими векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{j}^z$  на поверхности проводника.

Комплексное поверхностное сопротивление.

Раздел 9. Элементарные излучатели.

Тема 1. Элементарный электрический излучатель.

Определение и общие свойства элементарного электрического излучателя.

Тема 2. Векторный электрический потенциал и составляющие поля элементарного электрического излучателя.

Адаптация общего решения векторного электрического потенциала для элементарного электрического излучателя и его проекции в сферической системе координат. Составляющие поля

элементарного электрического излучателя.

Тема 3. Ближняя и дальняя зоны, диаграмма направленности элементарного электрического излучателя.

Определение ближней и дальней зон. Свойства полей в ближней и дальней зонах. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя. Мощность и сопротивление излучения.

Тема 4. Элементарный щелевой излучатель.

Понятие о магнитном токе. Составляющие поля элементарного магнитного излучателя в дальней зоне. Мощность и сопротивление излучения. Другие типы элементарного магнитного излучателя.

Раздел 10. Основные теоремы электродинамики.

Тема 1. Лемма Лоренца.

Определение соотношения, устанавливающего связь между разнесенными в пространстве сторонними источниками и возбуждаемыми ими полями в ограниченном и бесконечном объемах.

Тема 2. Теорема взаимности для элементарных излучателей.

Применение леммы Лоренца для получения соотношения, связывающего собственные и взаимные параметры разнесенных в пространстве элементарных излучателей.

Тема 3. Эквивалентные источники электромагнитного поля.

Фиктивные источники. Принцип эквивалентности. Принцип Гюйгенса – Кирхгофа.

Тема 4. Элемент Гюйгенса.

Электродинамическая модель элемента Гюйгенса. Составляющие поля элемента Гюйгенса в дальней зоне. Диаграмма направленности элемента Гюйгенса.

Раздел 11. Основы теории дифракции электромагнитных волн.

Тема 1. Строгая постановка задачи дифракции.

Описание процесса дифракции. Формулировка задачи дифракции.

Тема 2. Решение задачи дифракции плоской волны на идеально проводящем бесконечном. Круговом цилиндре. Анализ решения.

Тема 3. Приближенные методы решения задач дифракции.

Приближение Гюйгенса – Кирхгофа. Геометрическая оптика. Метод краевых волн. Геометрическая теория дифракции.

## **5. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ**

### **5.1. Текущий контроль успеваемости**

Рейтинг-контроль №1

#### **Вариант 1**

1. Для какого класса электромагнитных явлений справедлив закон полного тока в следующей форме:  $\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{j}^{\text{в}} d\vec{S}$ ;  $\text{rot} \vec{H} = \vec{j}^{\text{в}}$ ?

- 1) Стационарного;
- 2) Нестационарного;
- 3) Квазистационарного.

2. Как связано направление переноса мощности с ориентацией векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в плоской однородной волне?
- 1) Перпендикулярно плоскости расположения векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ ;
  - 2) Совпадает с вектором  $\vec{E}$ ;
  - 3) Совпадает с вектором  $\vec{H}$ .
3. Поясните физическое содержание задачи рассеяния плоской волны падающей на плоскую границу раздела сред.
- 1) Физический смысл основан на граничных условиях и условии излучения, согласно которому возбуждаемая поверхность порождает лишь уходящие от неё волны: отраженные и преломленные;
  - 2) Физический смысл решений основан на использовании леммы Лоренца и теоремы эквивалентности, согласно которым возбуждаемая поверхность порождает лишь уходящие от неё волны: отраженные и преломленные;
  - 3) Физический смысл решений основан на использовании принципа перестановочной двойственности и теоремы взаимности, согласно которым возбуждаемая поверхность порождает уходящие от неё волны: отраженные и преломленные.
4. Что понимается под плоской электромагнитной волной?
- Под плоской подразумевается волна, распространяющаяся вдоль линейной координаты и в любой фиксированный момент времени неизменная в плоскости, перпендикулярной этой координате:
- 1)  $\vec{P} = \vec{l}_z \dot{P}_z, \dot{E}_z = H_z = 0; \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} = 0; \frac{\partial}{\partial z} \neq 0;$
  - 2)  $\vec{P} = \vec{l}_z \dot{P}_z, E_z, H_z \neq 0; \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \neq 0; \frac{\partial}{\partial z} = 0;$
  - 3)  $\vec{P} = \vec{l}_z \dot{P}_z, E_z = H_z = 0; \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \neq 0; \frac{\partial}{\partial z} = 0.$

### Вариант 2

1. Истоками (стоками) какого вектора электрического поля являются как свободные, так и связанные электрические заряды?
- 1)  $\vec{E}$ ;
  - 2)  $\vec{D}$ ;
  - 3)  $\vec{P}$ .
2. Различаются ли фазовая скорость и скорость распространения энергии для однородной плоской волны в средах без потерь и в поглощающих средах?
- 1)  $V_{\phi|\sigma=0} > V_{\phi|\sigma \neq 0}; V_{\epsilon|\sigma=0} > V_{\epsilon|\sigma \neq 0};$

- 2)  $V_{\phi}|_{\sigma=0}=V_{\phi}|_{\sigma\neq 0}$ ;  $V_{\varepsilon}|_{\sigma=0}=V_{\varepsilon}|_{\sigma\neq 0}$ ;
- 3)  $V_{\phi}|_{\sigma=0}<V_{\phi}|_{\sigma\neq 0}$ ;  $V_{\varepsilon}|_{\sigma=0}<V_{\varepsilon}|_{\sigma\neq 0}$ .
3. При каких условиях в задаче рассеяния плоской волны на границе раздела диэлектрических сред отсутствует отражённая волна?
- 1) при параллельной поляризации,  $\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{\varepsilon_2/\varepsilon_1}$ ;
- 2) при нормальной поляризации,  $\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{\mu_2/\mu_1}$ ;
- 3) при круговой поляризации,  $\sin\varphi = n_2/n_1$ .
4. Что такое элементарный электрический излучатель и каковы его направленные свойства?
- 1) линейный проводник с переменным электрическим током, длина которого  $l \ll \lambda$ ;  $F(\theta) = \sin\theta$ ;  $F(\varphi) = 1$ ;
- 2) проводник с переменным электрическим током, длиной  $l \ll \lambda$ ;  $F(\theta) = 1$ ;  $F(\varphi) = \sin\theta$ ;
- 3) фрагмент фронта распространяющейся волны ( $\Delta S \ll \lambda^2$ );  $F(\theta) = (1/2)(1 + \cos\theta)$ .

### Вариант 3

1. Как выразить средний за период поток мощности через замкнутую поверхность  $S$ , ограничивающую объем  $V$ , включающий сторонние источники?
- а)  $P_{\Sigma \text{ср}} = R_{\varepsilon} \oint_S \dot{\mathbf{P}} d\bar{S}$ ;
- б)  $P_{\Sigma \text{ср}} = \oint_S \dot{\mathbf{P}} d\bar{S}$ ;
- в)  $P_{\Sigma \text{ср}} = \int_S \dot{\mathbf{P}} d\bar{S}$ .
2. В чем состоит главное различие волн в непоглощающих и поглощающих средах?
- 1)  $\sigma \neq 0$ :  $V_{\phi}$ ,  $V_{\varepsilon}$ ,  $\dot{Z}_c \sim f(\omega)$ ;
- 2)  $\sigma = 0$ :  $V_{\phi}$ ,  $V_{\varepsilon}$ ,  $\dot{Z}_c \sim f(\omega)$ ;
- 3)  $\sigma \neq 0$ :  $V_{\phi}$ ,  $V_{\varepsilon}$ ,  $\dot{Z}_c \neq f(\omega)$ .
3. При каких условиях в задаче рассеяния плоской волны на границе раздела диэлектрических сред отсутствует преломленная волна?
- 1)  $n_1 > n_2$ ,  $\varphi > \varphi_{\text{кр}}$ ;
- 2)  $n_1 < n_2$ ,  $\varphi > \varphi_{\text{кр}}$ ;
- 3)  $n_1 < n_2$ ,  $\varphi < \varphi_{\text{кр}}$ .
4. В чем заключается основные различия поля элементарного электрического излучателя в ближней и дальней зонах?
- 1)  $yr \gg 1$ :  $\dot{E}_{\theta}$ ,  $\dot{H}_{\varphi} \sim f(1/r)$ ;  $\dot{E}_{\theta}/\dot{H}_{\varphi} = Z_c$ ,  $\dot{\mathbf{P}} = R_c \dot{\mathbf{P}}$ ;
- 2)  $yr \gg 1$ :  $\dot{E}_{\theta}$ ,  $\dot{H}_{\varphi}$ ,  $\dot{E}_r \sim f(1/r^n)$ ;  $n \geq 2$ ,  $\dot{P}_{\Sigma} \approx \operatorname{Im}$ ;

$$3) \gamma r \ll 1: \dot{E}_\theta, \dot{H}_\varphi \sim f(1/rn); E_\theta/H_\varphi = Z_c; \dot{I} = \text{Re} \dot{I}.$$

## Рейтинг-контроль №2

**Вариант 1**

1. Всегда ли вектора напряженности и индукций коллинеарны?
  - 1)  $\vec{E} \parallel \vec{D}, \vec{H} \parallel \vec{B}$  в изотропных средах;
  - 2)  $\vec{E} \parallel \vec{D}, \vec{H} \parallel \vec{B}$  в анизотропных средах;
  - 3)  $\vec{E} \parallel \vec{D}, \vec{H} \parallel \vec{B}$  в гиромангнитных средах.
2. Могут ли электрические и магнитные составляющие поля плоской волны быть синфазны при распространении в поглощающей среде?
  - 1) Нет;
  - 2) Да;
  - 3) При действительном значении  $Z_c$ .
3. Что такое направляемые волны? Когда они являются поверхностными?
  - 1) Волна, распространяющаяся вдоль границы раздела; направляемая волна с экспоненциально убывающей в нормальном направлении к направляющей поверхности;
  - 2) Волна, распространяющаяся перпендикулярно границе раздела сред; волна экспоненциально убывающая в направлении распространения;
  - 3) Волна, распространяющаяся вдоль линейной координаты; волна с неизменными параметрами в плоскости перпендикулярной направлению распространения.
4. Как найти поле элементарного магнитного излучателя, используя принцип перестановочной двойственности?
 

В выражениях для поля элементарного электрического излучателя осуществить замены:

  - 1)  $\dot{E} \leftrightarrow \dot{H}; \dot{I}^3 \leftrightarrow -\dot{I}^m; \mu_a \leftrightarrow -\varepsilon_a;$
  - 2)  $\dot{E} \leftrightarrow -\dot{H}; \dot{I}^3 \leftrightarrow -\dot{I}^m; \mu_a \leftrightarrow -\varepsilon_a;$
  - 3)  $\dot{E} \leftrightarrow \dot{H}; \dot{I}^3 \leftrightarrow -\dot{I}^m; \mu_a \leftrightarrow \varepsilon_a.$

**Вариант 2**

1. Какой характер будет иметь диэлектрическая проницаемость: среды неоднородной изотропной и среды однородной анизотропной?
  - 1)  $\varepsilon = f(P); \varepsilon = \|\varepsilon\|;$
  - 2)  $\varepsilon = f(P); \varepsilon = \text{const};$



- 3)  $\varepsilon = \|\varepsilon\|$ ;  $\varepsilon = f(P)$ .
2. Каким соотношением связаны поперечные составляющие плоской волны, распространяющейся в положительном направлении координаты  $Z$ ?
- 1)  $\dot{H}_1 = 1/\dot{Z}_c [\overline{1_z \dot{E}_1}]$ ;
  - 2)  $\overline{\dot{H}_1} = z_c [\overline{1_z \dot{E}_1}]$ ;
  - 3)  $\overline{\dot{H}_1} = z_c [\dot{E}_1 \overline{1_z}]$ .
3. В каких пределах лежит значение фазовой скорости направляемой поверхностной волны на границе раздела диэлектрических сред?
- 1)  $v_{01} < v_\phi < v_{02}$ ;
  - 2)  $v_{01} > v_\phi > v_{02}$ ;
  - 3)  $c < v_\phi < v_{02}$ .
4. Как вычислить мощность излучения элементарного электрического и магнитного излучателей?
- 1)  $P_{\Sigma_{cp}} = \oint_S \overline{\Pi}_{cp} d\overline{S}$ ;
  - 2)  $P_{\Sigma_{cp}} = \int_S \overline{\Pi}_{cp} d\overline{S}$ ;
  - 3)  $P_{\Sigma_{cp}} = \int_V \overline{\Pi}_{cp} dV$ .

### Вариант 3

1. Каким граничным условиям удовлетворяют нормальные и тангенциальные составляющие электромагнитного поля на границе раздела сред с различными электродинамическими параметрами?
- 1)  $E_{1\tau} = E_{2\tau}$ ;  $H_{1\tau} = H_{2\tau}$ ;  $D_{1n} = D_{2n}$ ;  $B_{1n} = B_{2n}$ ;
  - 2)  $D_{1\tau} = D_{2\tau}$ ;  $B_{1\tau} = B_{2\tau}$ ;  $E_{1n} = E_{2n}$ ;  $H_{1n} = H_{2n}$ ;
  - 3)  $E_{1\tau} = E_{2\tau}$ ;  $H_{1n} = H_{2n}$ ;  $D_{1n} = D_{2n}$ ;  $B_{1n} = B_{2n}$ .
2. Как выглядит фазовый множитель плоской волны, распространяющейся в направлении  $Z'$ , составляющем с осями декартовой системы координат углы  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ ?
- 1)  $e^{-jkz'} = e^{-jk(x\cos\varphi_x + y\cos\varphi_y + z\cos\varphi_z)}$ ;
  - 2)  $e^{-jkz'} = e^{-jk(x\operatorname{tg}\varphi_x + y\operatorname{tg}\varphi_y + z\operatorname{tg}\varphi_z)}$ ;
  - 3)  $e^{-jkz'} = e^{-jk(x\sin\varphi_x + y\sin\varphi_y + z\sin\varphi_z)}$ .
3. Как связаны между собой фазовая скорость и скорость распространения энергии направляемой поверхностной волны, существующей на границе раздела диэлектрических сред?
- 1)  $v_\phi v_g = v_{01}^2$ ;

- 2)  $v_\phi = v_\omega$ ;
- 3)  $v_\phi v_\omega = v_{02}^2$ .
4. Что понимается под сопротивлением излучения элементарного электрического излучателя? Каков его физический смысл?
- 1)  $P_{\Sigma_{\text{ср}}} = I^2 R_\Sigma / 2$ ;  $I^2 = \text{const}$ ,  $R_\Sigma \uparrow \rightarrow P_{\Sigma_{\text{ср}}} \uparrow$ ;
- 2)  $P_{\Sigma_{\text{ср}}} = U_m^2 / 2R_{\Sigma_{\text{щ}}}$ ;  $U_m = \text{const}$ ,  $R_{\Sigma_{\text{щ}}} \uparrow \rightarrow P_{\Sigma_{\text{ср}}} \downarrow$ ;
- 3)  $P_{\Sigma_{\text{ср}}} = (R_\Sigma / 2) \oint_S |\dot{\vec{H}}_{\text{ом}}|^2 dS$ ;  $R_\Sigma \uparrow \rightarrow P_{\Sigma_{\text{ср}}} \uparrow$ .

#### Вариант 4

1. Какие граничные условия выполняются на поверхности идеального проводника?
- 1)  $E_{1\tau} = 0$ ;  $H_{1n} = 0$ ;
- 2)  $E_{1n} = 0$ ;  $H_{1\tau} = 0$ ;
- 3)  $\dot{\vec{I}}_\tau \dot{E}_{1\tau} = \dot{Z}_{c_2} [\dot{\vec{I}}_n \dot{\vec{H}}_1]$ .
2. Определите поляризацию плоской волны, распространяющейся вдоль координаты  $Z$  и образованную наложением двух ортогонально поляризованных волн одного направления:  $\dot{\vec{E}}_m = \dot{\vec{E}}_{m1} + \dot{\vec{E}}_{m2} = (\dot{\vec{I}}_x \dot{A} + \dot{\vec{I}}_y \dot{B}) e^{-jkz}$ , если фазы волн совпадают ( $\dot{A} = A e^{j\varphi}$ ,  $\dot{B} = B e^{j\varphi}$ ):
- 1) линейная;
- 2) круговая;
- 3) эллиптическая.
3. Какие особенности наблюдаются в случае наклонного падения плоской волны из диэлектрика на плоскую идеально проводящую поверхность?
- 1) полное внутреннее отражение при любом угле падения;
- 2) полное внутреннее отражение при  $\varphi > \varphi_{\text{кр}}$ ;
- 3) полное внутреннее отражение при  $\varphi = \varphi_{\text{Б}}$ .
4. Что понимают под поверхностным сопротивлением проводника?
- 1)  $\dot{Z}_S, \dot{\vec{E}}_0 = \dot{Z}_S \dot{\vec{J}}^3$ ;
- 2)  $\dot{Z}_S, \dot{\vec{E}} = \dot{Z}_S [\dot{\vec{H}}, \dot{\vec{I}}_Z]$ ;
- 3)  $R_\Sigma, P_{\Sigma_{\text{ср}}} = (I^2 \cdot R_\Sigma) / 2$ .

Рейтинг-контроль №3

#### Вариант 1

1. Какое соотношение можно рассматривать в качестве критерия деления сред на проводники и диэлектрики?

- 1)  $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a} \gg 1$  – проводники;  $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a} \ll 1$  – диэлектрики;
- 2)  $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a} \ll 1$  – проводники;  $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a} \gg 1$  – диэлектрики;
- 3)  $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a} \ll 0$  – проводники;  $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a} = \infty$  – диэлектрики.

2. Определить поляризацию плоской волны, распространяющейся вдоль координаты Z, и образованную наложением двух ортогонально поляризованных волн одного направления:  $\dot{\vec{E}}_m = \dot{\vec{E}}_{m1} + \dot{\vec{E}}_{m2} = (\bar{1}_x \dot{A} + \bar{1}_y \dot{B}) e^{-jkz}$ , при одинаковых амплитудах ( $A = B$ ) и фазовом различии  $90^\circ$ :  $\dot{A} = A e^{j\varphi}$ ,  $\dot{B} = B e^{j(\varphi - 90^\circ)}$ .

- 1) круговая правая;
- 2) круговая левая;
- 3) эллиптическая;

3. Какие особенности имеет преломленная волна при падении плоской волны на границу поглощающей среды?

- 1)  $\varphi_n = \varphi_d$ ;
- 2)  $\varphi_n = \varphi_0$ ;
- 3)  $\varphi_n = \varphi$ ;

4. Зачем вводится понятие эквивалентного поверхностного тока? Каким образом определяется его величина?

- 1) для упрощения расчетов;  $\dot{\vec{J}}^3 = [\bar{1}_n \dot{\vec{H}}_0]$
- 2) для уточнения расчетов;  $\int_{\Delta S} \dot{\vec{J}}^3 d\bar{S} = \oint_L \dot{\vec{H}} d\bar{l}$ ;
- 3) для повышения достоверности;  $\dot{\vec{J}}^3 = \sigma \dot{\vec{E}}$ .

### Вариант 2

1. Какой характерной особенностью с точки зрения распределения зарядов обладают среды с проводимостью отличной от нуля?

- 1)  $\rho^3(\mathbf{p}, t) = \dot{\rho}^3(\mathbf{p}, 0) e^{-(\sigma/\varepsilon_a)t}$ ;
- 2)  $\rho^3(\mathbf{p}, t) = \dot{\rho}^3(\mathbf{p}, 0) e^{(\sigma/\varepsilon_a)t}$ ;
- 3)  $\rho^3(\mathbf{p}, t) = \dot{\rho}^3(\mathbf{p}, 0) e^{(\varepsilon_a/\sigma)t}$ .

2. С какими особенностями связано распространение плоских волн в реальных диэлектриках?

$$1) \operatorname{tg} \delta \ll 1; \beta = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a} \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \delta / 8); v_{\Phi} = v_{\Sigma} = v_0 / (1 + \operatorname{tg}^2 \delta / 8);$$

$$\alpha \cong \left(\frac{\sigma}{2}\right) \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} - \text{дисперсия выражена слабо};$$

$$2) \operatorname{tg} \delta \gg 1; \beta = \alpha = \omega \sqrt{\mu_0 \delta / 2}; v_{\Phi} = v_{\Sigma} = \sqrt{2\omega / \mu_0 \sigma};$$

$$\lambda = 2\pi / \sqrt{f \mu_a \sigma}; - \text{дисперсия выражена сильно};$$

$$3) \operatorname{tg} \delta = 0; \beta = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a}; v_{\Phi} = v_{\Sigma} = v_0; \lambda = v_0 / f - \text{дисперсия отсутствует};$$

3. В чём состоит приближённость граничных условий Щукина-Леонтовича?

$$1) \bar{\mathbf{I}}_{\tau} \dot{E}_{1\tau} = \dot{Z}_{c2} [\bar{\mathbf{I}}_n \dot{H}_1]; \varphi_g \cong 0;$$

$$2) \dot{E}_2 = \dot{Z}_{c2} [\bar{\mathbf{I}}_n \dot{H}_1]; \operatorname{tg} \varphi_g = \frac{k_1 \sin \varphi}{\operatorname{Re} \sqrt{k_2^2 - k_1^2 \sin^2 \varphi}}$$

$$3) \dot{E}_0^{\text{мп}} = \dot{E}_0^{\text{пзд}} \Gamma_{\perp(0)}; \sin \varphi_n = k_1 / k_2 \sin \varphi.$$

4. В чём физическая суть принципа эквивалентности?

Замена известного распределения поля на поверхности:  $\dot{E}_s, \dot{H}_s$  - распределением эквивалентных сторонних источников:

$$1) \dot{J}^{\Sigma} = [\bar{\mathbf{I}}_n \dot{H}^s]; \tau^{\Sigma} = \varepsilon_a (\bar{\mathbf{I}}_n \dot{E}^s); \dot{J}^{\text{M}} = -[\bar{\mathbf{I}}_n \dot{E}^s]; \tau^{\text{M}} = \mu_a (\bar{\mathbf{I}}_n \dot{H}^s);$$

$$2) \dot{J}^{\Sigma} = [\bar{\mathbf{I}}_n \dot{E}^s]; \tau^{\Sigma} = \mu_a (\bar{\mathbf{I}}_n \dot{H}^s); \dot{J}^{\text{M}} = [\bar{\mathbf{I}}_n \dot{H}^s]; \tau^{\text{M}} = \varepsilon_a (\bar{\mathbf{I}}_n \dot{E}^s);$$

$$3) \dot{J}^{\Sigma} = [\bar{\mathbf{I}}_n \dot{H}^s]; \tau^{\Sigma} = \mu_a (\bar{\mathbf{I}}_n \dot{H}^s); \dot{J}^{\text{M}} = [\bar{\mathbf{I}}_n \dot{E}^s]; \tau^{\text{M}} = \varepsilon_a (\bar{\mathbf{I}}_n \dot{E}^s).$$

### Вариант 3

1. Может ли мощность сторонних источников быть отрицательной величиной?

$$1) \text{ да, } P_{\text{ст}} < 0, \text{ если } \bar{E} \dot{J}^{\text{ст}} > 0;$$

$$2) \text{ да, } P_{\text{ст}} < 0, \text{ если } \bar{E} \dot{J}^{\text{ст}} < 0;$$

$$3) \text{ нет, } P_{\text{ст}} > 0 - \text{ всегда.}$$

2. С какими особенностями связано распространение плоских волн в реальных проводниках?

$$1) \operatorname{tg} \delta \gg 1, \beta = \alpha = \sqrt{\omega \mu_a \sigma / 2}; v_{\Phi} = v_{\Sigma} = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu_a \sigma}}; \lambda = \frac{2\pi}{\sqrt{f \mu_a \sigma}} - \text{дисперсия выражена}$$

сильно;

$$2) \operatorname{tg} \delta \ll 1; \beta = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a} \cdot \left(1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \delta}{8}\right); v_{\Phi} = v_{\Sigma} = v_0 / \left(1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \delta}{8}\right); \lambda \cong (\sigma / 2) \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} - \text{дисперсия}$$

выражена слабо;

$$3) \quad \operatorname{tg} \delta = 0; \beta = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a} \left( 1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \delta}{8} \right); v_{\Phi} = v_{\Sigma} = v_0, \lambda = v_0 / f - \text{дисперсия отсутствует;}$$

3. Как выглядят приближенные граничные условия Щукина-Леонтовича?

$$1) \quad \dot{\bar{I}}_{\tau} \dot{E}_{1\tau} = \dot{z}_{c2} [\bar{I}_n \dot{H}_1];$$

$$2) \quad E_{1\tau} = E_{2\tau}; \quad H_{1\tau} = H_{2\tau}; \quad D_{1n} = D_{2n}; \quad B_{1n} = B_{2n};$$

$$3) (D_{1n} - D_{2n}) = \tau^3; \quad [\bar{I}_n \dot{E}_1] - [\bar{I}_n \dot{E}_2] = -\dot{j}^m; \quad (B_{1n} - B_{2n}) = \tau^m;$$

$$[\bar{I}_n \dot{H}_1] - [\bar{I}_n \dot{H}_2] = \dot{j}^m.$$

4. Что собой представляет элемент Гюйгенса? Какими направленными свойствами он обладает?

$$1) \text{ элемент фронта распространяющейся волны: } F(\theta) = (1/2)(1 + \cos\theta);$$

$$2) \text{ линейный проводник с переменным электрическим током, длиной } l \ll \lambda; \quad F(\theta) = \sin\theta; \\ F(\varphi) = 1;$$

$$3) \text{ рамочный проводник с переменным электрическим током, длиной } l \ll \lambda; \quad F(\theta) = 1; \\ F(\varphi) = \sin\theta.$$

## 5.2. Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины

Вопросы к экзамену.

1. Векторы электрического поля.
2. Векторы магнитного поля.
3. Классификация сред.
4. Графическое изображение полей.
5. Потенциальные и вихревые поля.
6. Уравнение непрерывности.
7. Закон сохранения заряда.
8. Третье уравнение Максвелла.
9. Четвертое уравнение Максвелла.
10. Первое уравнение Максвелла.
11. Второе уравнение Максвелла.
12. Закон Ома в дифференциальной форме.
13. Уточнение понятия о проводниках и диэлектриках.
14. Полная система уравнений Максвелла.
15. Классификация электромагнитных явлений.
16. Уравнение Максвелла и сторонние токи.
17. Граничные условия для нормальных составляющих векторов электрического поля. Поверхностные заряды.
18. Граничные условия для касательных составляющих векторов электрического поля.
19. Граничные условия для нормальных составляющих векторов магнитного поля.

20. Граничные условия для касательных составляющих векторов магнитного поля. Поверхностный ток .
21. Полная система граничных условий. Граничные условия на поверхности идеального проводника .
22. Баланс энергий электромагнитного поля .
23. Плотность энергии электромагнитного поля .
24. Скорость распространения энергии электромагнитного поля .
25. Уравнение максвелла для монохроматического поля .
26. Уравнение баланса для средней за период мощности .
27. Уравнение баланса для комплексной мощности .
28. Теорема единственности для внутренней и внешней задач электродинамики .
29. Уравнение Гельмгольца .
30. Электродинамические потенциалы для комплексных амплитуд .
31. Решение неоднородного уравнения Гельмгольца.
32. Уравнение Максвелла с учётом магнитных токов и зарядов .
33. Плоские волны в однородной изотропной среде без потерь .
34. Плоские волны в однородной изотропной среде с проводимостью отличной от нуля .
35. Электромагнитные волны в реальных диэлектриках .
36. Электромагнитные волны в реальных проводниках .
- 37.** Поляризация волн .
38. Плоские волны, распространяющиеся в произвольном направлении .
39. Падение плоской волны на границу раздела двух диэлектриков (нормальная поляризация).
40. Падение плоской волны на границу раздела двух диэлектриков (параллельная поляризация) .
41. Условие полного прохождения волны во вторую среду. Угол Брюстера .
42. Полное отражение от границы раздела двух сред (две диэлектрические среды) – поле в первой среде .
43. Полное отражение от границы раздела двух сред (две диэлектрические среды) – поле во второй среде .
44. Полное отражение от границы раздела двух сред (диэлектрик и идеальный проводник) .
45. Падение плоской волны на границу поглощающей среды .
46. Падение плоской волны на границу хорошо проводящей среды .
47. Приближенные граничные условия Щукина-Леонтовича .
48. Явление поверхностного эффекта .
49. Потери энергии в проводниках .
50. Эквивалентный поверхностный ток .
- 51.** Поверхностное сопротивление проводника .
52. Элементарный электрический излучатель .
53. Векторный электрический потенциал для элементарного электрического излучателя .
54. Составляющие электромагнитного поля элементарного электрического излучателя .
55. Ближняя и дальняя зоны элементарного электрического излучателя .
56. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя .
57. Мощность излучения элементарного электрического излучателя. Сопротивление излучения .

58. Понятие о магнитном токе .
59. Элементарный щелевой излучатель .
60. Лемма Лоренца .
61. Теорема взаимности для элементарных излучателей.
62. Эквивалентные источники электромагнитного поля. Принцип Гюйгенса .
63. Элемент Гюйгенса .
64. Строгая постановка задачи дифракции .
65. Дифракция плоской волны на круговом цилиндре .
66. Приближение Гюйгенса-Кирхгофа .
67. Геометрическая оптика .
68. Метод краевых волн .
69. Геометрическая теория дифракции .

### 5.3. Самостоятельная работа обучающегося.

СРС с лекционными материалами.

Вопросы структурированные к СРС.

1. Введение. Место и назначение предмета в системе радиотехнических дисциплин, его основное содержание. Роль макроскопической теории электромагнитного поля в радиотехнике и радиоэлектронике.
2. Электромагнитное поле и параметры сред. Векторы электромагнитного поля. Классификация сред. Графическое изображение полей. Потенциальные и вихревые поля. КОФ, ВА, 2=>3, 4; КОФ - курс общей физики, ВА - векторный анализ, КЛ - конспект лекций. Литература: 6.1, [1] с. 12-25; КЛ с. 3-11.
3. Основные уравнения электродинамики. Первое уравнение Максвелла. Второе уравнение Максвелла. Третье уравнение Максвелла. Четвертое уравнение Максвелла. Уравнение непрерывности. Закон Ома в дифференциальной форме. Уточнение понятия о проводниках и диэлектриках в свете уравнений Максвелла. Классификация электромагнитных явлений. Уравнение Максвелла и сторонние токи.  
2, 3=>4, 5, 6, 7, 8, 10.  
Литература: 6.1, [1] с. 25-38; КЛ с 11-23.
4. Граничные условия. Неприменимость уравнений Максвелла в дифференциальной форме на границе раздела двух сред. Граничные условия для векторов электрического поля. Граничные условия для векторов магнитного поля. Полная система граничных условий. Граничные условия на поверхности идеального проводника.  
3, 4=>7, 8, 10.  
Литература: 6.1, [1] с. 40-48; КЛ с 23-31.
5. Энергия электромагнитного поля. Баланс энергии электромагнитного поля. Плотность энергии электромагнитного поля. Скорость распространения электромагнитной энергии. Уравнение Максвелла для монохроматического поля. Уравнение баланса для средней за период мощности. Комплексная мощность. Теорема единственности для внутренних и внешних задач электродинамики.  
2, 5=>7, 10.  
Литература: 6.1, [1] с. 52-69; КЛ с. 31-49.

6. Волновые уравнения. Уравнение Гельмгольца. Электродинамические потенциалы для комплексных амплитуд. Решение неоднородных уравнений Гельмгольца. Уравнение Максвелла с учетом магнитных токов и зарядов.

2, 3, 4, 5, 6=>7, 10, 12.

Литература: 6.1, [1] с. 75-86; КЛ с.49-62.

7. Плоские волны. Плоские электромагнитные волны в однородной изотропной среде. Плоские волны в однородной изотропной среде без потерь. Плоские волны в однородной изотропной среде с проводимостью, отличной от нуля. Поляризация волн.

2, 6, 7=>8, 9, 10, 12.

Литература: 6.1, [1] с. 166-182; КЛ с.63-90.

8. Отражение и преломление плоских электромагнитных волн. Волновые явления на границе раздела двух сред. Поле плоской волны, распространяющейся в произвольном направлении. Падение плоской волны на границу раздела двух диэлектриков. Условия полного прохождения волны во вторую среду. Полное отражение от границы раздела двух сред. Падение плоской волны на границу поглощающей среды. Приближенные граничные условия Щукина - Леонтовича.

2, 6, 7, 8=>10, 12.

Литература: 6.1, [1] с. 183-204; КЛ с. 90-94.

9. Поверхностный эффект. Явление поверхностного эффекта. Потери энергии в проводнике. Эквивалентный поверхностный ток. Поверхностное сопротивление проводника.

6, 7, 8, 9=>10, 12.

Литература: 6.1, [1] с. 205-212; КЛ с. 94-98.

10. Элементарные излучатели. Излучение электромагнитных волн. Элементарный электрический излучатель. Анализ структуры поля элементарного электрического излучателя. Диаграмма направленности элементарного электрического излучателя. Мощность излучения элементарного электрического излучателя. Элементарный магнитный излучатель.

2, 3, 5, 6, 10=>11, 12.

Литература: 6.1, [1] с. 136-154; КЛ с. 98-110.

11. Основные теоремы электродинамики. Теорема единственности для внутренних и внешних задач электродинамики. Принцип перестановочной двойственности уравнений Максвелла. Лемма Лоренца. Теорема взаимности для элементарных излучателей. Эквивалентные источники электромагнитного поля. Принцип Гюйгенса - Кирхгофа. Элемент Гюйгенса.

2, 3, 5, 6, 10, 11=>12.

Литература: 6.1, [1] с. 63-70, 149, 157-165; КЛ с. 111-121.

12. Основы теории дифракции электромагнитных волн. Строгая постановка задач дифракции. Дифракция плоской волны на круговом цилиндре. Приближение Гюйгенса - Кирхгофа. Геометрическая оптика. Геометрическая теория дифракции.

Литература: 6.1, [1] с. 213-238; КЛ с. 122-136.



Фонд оценочных материалов (ФОМ) для проведения аттестации уровня сформированности компетенций обучающихся по дисциплине оформляется отдельным документом.

## 6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 6.1. Книгообеспеченность

Наименование литературы: автор, название, вид издания, издательство	Год издания	КНИГООБЕСПЕЧЕННОСТЬ
		Наличие в электронном каталоге ЭБС
Основная литература		
1. Кураев А.А., Попкова Т.Л., Синицын А.К. Электродинамика и распространение радиоволн: учебное пособие / А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.К. Синицын. – М.: НИЦ Инфра-М; Мн.: Нов. знание, 2013. – 424 с. ISBN 978-5-16-006211-2	2013	<a href="http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=367972">http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=367972</a>
2. Муромцев Д.Ю., Зырянов Ю.Т., Федюнин П.А. Электродинамика и распространение радиоволн: учебное пособие / Д.Ю. Муромцев, Ю.Т. Зырянов, П.А. Федюнин. – М.: Изд. 2-ое. М.: «Лань», 2014. – 443 с. ISBN 979-5-8114-1637-0	2014	<a href="http://www.lanbook.com/books/element.php?p/1_cid/68&amp;p/1_id=1107">http://www.lanbook.com/books/element.php?p/1_cid/68&amp;p/1_id=1107</a>
3. Гаврилов В.М. Электродинамика и распространение радиоволн: лаб. практикум/ В.М. Гаврилов, Н.Н. Корнеева; Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. – Изд. 2-е доп. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2020.-100 с. ISBN 978-5-9984-1106-9.	2020	<a href="http://e.lib.vlsu.ru:80/handle/123456789/8283">http://e.lib.vlsu.ru:80/handle/123456789/8283</a>
4. Крамм М.Н. Сборник задач по основам электродинамики: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во «Лань», 2021. – 256с. ISBN 978-58114-1122-1	2021	<a href="http://e.lanbook.com/reader//book/167874/">http://e.lanbook.com/reader//book/167874/</a>
Дополнительная литература		
1. Боков Л.А. Электродинамика и распространение радиоволн (электронный ресурс): учебное пособие / Л.А. Боков, В.А. Замотринский, А.Е. Мандель. – Электронные текстовые данные. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 301 с. ISSN 2227-8397	2012	<a href="http://www.iprbooksshop.ru/13874.html">http://www.iprbooksshop.ru/13874.html</a>
2. Электродинамика: Учебное пособие / И.Ф. Будагян, В.Ф. Дубровин, А.С. Сигов. - М.: Альфа-М: НИЦ ИНФРА-М, 2013. - 304 с. ISBN 978-5-98281-329-9	2013	<a href="http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=391337">http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=391337</a>

### 6.2. Периодические издания

Электродинамика, Техническая электродинамика, Радиофизика, Радиотехника и электроника.

### 6.3. Интернет-ресурсы

- <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=367972>;
- [http://www.lanbook.com/books/element.php?p/1\\_cid/68&p/1\\_id=1107](http://www.lanbook.com/books/element.php?p/1_cid/68&p/1_id=1107);
- <http://e.lib.vlsu.ru:80/handle/123456789/6608>;
- <http://www.iprbooksshop.ru/13874.html>;
- <http://iprbooksshop.ru/13969>;

<http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=391337>.

## 7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Для реализации учебного процесса по данной дисциплине имеется специальное помещение для проведения занятий лекционного, практического и лабораторного типов, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, для самостоятельной работы. Лекционные и практические занятия, лабораторные работы проводятся в лаборатории «Электродинамика и распространение радиоволн», (510 -3).

Материально-техническое обеспечение дисциплины включает:

- лабораторные макеты и измерительное оборудование специализированной лаборатории (510-3) по дисциплине РФЭК (2 физических лабораторных работы): Г4-114 , Г4-37А, Г4-80 – 1 шт; В3-38 – 3 шт., ВМТД-Д – 1шт;
- компьютеры со специализированным программным обеспечением LabVIEW в лаборатории (510-3) для выполнения виртуальных лабораторных работ по дисциплине РФЭК (2 виртуальные работы).

Рабочую программу составил Гаврилов В.М., доцент кафедры РТ и РС  
Рецензент

«Владимирское КБ Радиосвязи», Генеральный директор Богданов А.Е.

Программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры РТ и РС

Протокол № 1 от 30.05.21 года

Заведующий кафедрой Никитин О.Р.

Рабочая программа рассмотрена и одобрена

на заседании учебно-методической комиссии направления 11.03.01 Радиотехника

Протокол № 1 от 1.09.21 года

Председатель комиссии Никитин О.Р., заведующий кафедрой

## ЛИСТ ПЕРЕУТВЕРЖДЕНИЯ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ

Рабочая программа одобрена на 20\_\_\_\_ / 20\_\_\_\_ учебный года

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

Рабочая программа одобрена на 20 \_\_\_\_ / 20 \_\_\_\_ учебный года

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_ от \_\_\_\_ года

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

Рабочая программа одобрена на 20 \_\_\_\_ / 20 \_\_\_\_ учебный года

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_ от \_\_\_\_ года

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

### ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

в рабочую программу дисциплины

Радиофизика электронных колебаний

образовательной программы направления подготовки 11.03.01 Радиотехника, направленность:  
Электронные цифровые устройства и системы (бакалавр)

Номер изменения	Внесены изменения в части/разделы рабочей программы	Исполнитель ФИО	Основание (номер и дата протокола заседания кафедры)
1			
2			

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

*Подпись*

*ФИО*