

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

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Прикладная электродинамика

Уровень высшего образования

Бакалавриат

Направление подготовки / специальность

03.03.03 - Радиофизика

Направленность образовательной программы

Радиофизика и электроника

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.О.23 Прикладная электродинамика относится к обязательной части образовательной программы.

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	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ОПК-1: Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности;	ОПК-1.1: Обладает фундаментальными знаниями в области физики и радиофизики ОПК-1.2: Анализирует физические аспекты теории и возможности ее использования для решения научно-исследовательских задач ОПК-1.3: Решает научно-исследовательские задачи, в том числе в сфере педагогической деятельности	ОПК-1.1: Знать: фундаментальные понятия, принципы и положения электродинамики, основные законы теории поля Уметь: анализировать полученные знания и возможности их использования в профессиональной деятельности Владеть: навыками решения профессиональных задач в области электродинамики ОПК-1.2: Знать: фундаментальные понятия, принципы и положения электродинамики, основные законы теории поля Уметь: анализировать полученные знания и возможности их использования в профессиональной деятельности Владеть: навыками решения профессиональных задач в области электродинамики ОПК-1.3: Знать: фундаментальные понятия, принципы и положения электродинамики, основные законы теории поля Уметь: анализировать	Тест	Экзамен: Контрольные вопросы Тест

		<p>полученные знания и возможности их использования в профессиональной деятельности</p> <p>Владеть: навыками решения профессиональных задач в области электродинамики</p>		
<p>ОПК-2: Способен проводить экспериментальные и теоретические научные исследования объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;</p>	<p>ОПК-2.1: Использует методы радиофизических измерений и методы обработки результатов</p> <p>ОПК-2.2: Формулирует задачи экспериментального и теоретического исследования в области радиофизики, использует радиофизическое измерительное оборудование и применяет теоретические методы</p> <p>ОПК-2.3: Применяет практические навыки радиофизических исследований и представления результатов</p>	<p>ОПК-2.1:</p> <p>Знать: закономерности распространения электромагнитных волн в неоднородном пространстве, а также методы расчета полей электромагнитных волн и колебаний в линиях передачи и резонаторах</p> <p>Уметь: самостоятельно приобретать новые знания в области прикладной электродинамики, используя современные образовательные и информационные технологии</p> <p>Владеть: опытом самостоятельного приобретения новых знаний в области электродинамики с использованием современных образовательных и информационных технологий</p> <p>ОПК-2.2:</p> <p>Знать: закономерности распространения электромагнитных волн в неоднородном пространстве, а также методы расчета полей электромагнитных волн и колебаний в линиях передачи и резонаторах</p> <p>Уметь: самостоятельно приобретать новые знания в области прикладной электродинамики, используя современные образовательные и информационные технологии</p> <p>Владеть: опытом самостоятельного приобретения новых знаний в области электродинамики с</p>	<p>Контрольная работа</p>	<p>Экзамен:</p> <p>Контрольные вопросы</p>

		<p>использованием современных образовательных и информационных технологий</p> <p>ОПК-2.3:</p> <p>Знать: закономерности распространения электромагнитных волн в неоднородном пространстве, а также методы расчета полей электромагнитных волн и колебаний в линиях передачи и резонаторах</p> <p>Уметь: самостоятельно приобретать новые знания в области прикладной электродинамики, используя современные образовательные и информационные технологии</p> <p>Владеть: опытом самостоятельного приобретения новых знаний в области электродинамики с использованием современных образовательных и информационных технологий</p>		
--	--	---	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	4
Часов по учебному плану	144
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	32
- КСР	2
самостоятельная работа	33
Промежуточная аттестация	45
	Экзамен

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование 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 (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
Тема 1. Введение	4	2	2	4	
Тема 2. Электромагнитные волны, в направляющих системах (линиях передачи)	39	14	14	28	11
Тема 3. Описание волн в линиях передачи в терминах тока и напряжения	21	6	6	12	9
Тема 4. Собственные колебания в полых резонаторах	14	4	4	8	6
Тема 5. Возбуждение волноводов и резонаторов заданными источниками	11	4	4	8	3
Тема 6. Элементы теории дифракции электромагнитных волн на металлических и диэлектрических телах	8	2	2	4	4
Аттестация	45				
КСР	2				2
Итого	144	32	32	66	33

Содержание разделов и тем дисциплины

Раздел 1. Введение.

1.1. Общая характеристика и практическое значение теории электромагнитных волновых процессов в сплошных средах. Краевые задачи электродинамики при наличии проводников и диэлектриков. Общий план построения курса.

Раздел 2. Электромагнитные волны в направляющих системах (линиях передачи).

2.1. Общее решение уравнений Максвелла для монохроматических направляемых волн. Выражение векторов поля нормальных волн в линии передачи через скалярные функции поперечных координат. Классификация направляемых волн и линий передачи; волны типов ТЕ, ТМ и ТЕМ; гибридные волны; быстрые и медленные волны; открытые и закрытые линии передачи. Двумерное уравнение Гельмгольца. Поперечное и продольное волновые числа.

2.2. Общие свойства волн в линиях передачи с идеально проводящими границами. Граничные условия для поперечных волновых функций. Формулировка и общая характеристика решений краевых задач для волн различных типов. Действительность спектра поперечных волновых чисел. Дисперсионные уравнения. Режимы распространения и запыриания. Критические частоты. Длина волны, фазовая и групповая скорости. Характеристический импеданс. Мощность, переносимая волной. Соотношения ортогональности и аддитивность потоков энергии парциальных волн. Условия существования главных (ТЕМ) волн.

2.3. Линии передачи конкретного вида; прямоугольный и круглый волноводы, коаксиальный кабель, двухпроводная и полосковая линии. Спектры поперечных волновых чисел; критические частоты и длины волн. Структура поля волн низших типов. Представление полей волновых мод в виде суперпозиции плоских волн в свободном пространстве (концепция Бриллюэна).

2.4. Затухание волн в неидеальной линии передачи. Потери энергии в среде, заполняющей волновод. Потери энергии в стенках волновода; скин-эффект; граничное условие Леонтовича; поверхностный импеданс стенки.

2.5. Описание главных (ТЕМ) волн в линии передачи в терминах тока и напряжения. Эквивалентные погонные параметры и волновое сопротивление линии. Телеграфные уравнения. Отражение волны от нагрузки; преобразование импедансов; согласование линии с нагрузкой.

2.6. Линии передачи, направляющие медленные (поверхностные) волны. Классификация замедляющих систем. Волны в диэлектрическом слое и в круглом диэлектрическом стержне; волоконный световод. Поверхностная волна над ребристой металлической структурой.

2.7. Поля, создаваемые в линиях передачи сторонними монохроматическими токами. Расчет амплитуд возбуждаемых волн с помощью леммы Лоренца. Поля внутри и вне области источников. Способы возбуждения волноводов.

Раздел 3. Электромагнитные колебания в полых резонаторах.

3.1. Общая постановка задачи о собственных колебаниях в резонаторах с идеально проводящими стенками. Основные свойства полей нормальных (собственных) колебаний; действительность спектра собственных частот; равенство средних значений электрической и магнитной энергии; соотношения ортогональности.

3.2. Резонаторы, представляющие собой отрезки линий передачи. Структура поля и спектры собственных частот колебаний в прямоугольном, цилиндрическом и коаксиальном резонаторах. Квазистационарные резонаторы. Поля и собственные частоты тороидального и магнетронного резонаторов.

3.3. Затухание собственных колебаний в резонаторах. Расчет декрементов затухания, обусловленного потерями энергии в заполняющей среде и в стенках резонатора. Добротность колебаний.

Раздел 4. Возбуждение волноводов и резонаторов заданными источниками.

4.1. Лемма Лоренца и теорема взаимности для монохроматического электромагнитного поля, создаваемого произвольными системами электрических и магнитных токов.

4.2. Поля, создаваемые в линиях передачи сторонними монохроматическими токами. Представлений полей в виде суперпозиции собственных мод. Расчет амплитуд возбуждаемых волн с помощью леммы Лоренца. Поля внутри и вне области источников. Способы возбуждения волноводов.

4.3. Вынужденные электромагнитные колебания, возбуждаемые сторонними монохроматическими токами в полых резонаторах. Вихревые и потенциальные поля. Разложение вихревых полей по собственным модам резонатора. Резонансные спектры идеального и неидеального резонаторов. Способы возбуждения резонаторов.

Раздел 5. Элементы теории дифракции электромагнитных волн.

5.1. Общая постановка задачи дифракции. Классификация и краткий обзор точных и приближенных методов решения дифракционных задач. Длинноволновые и коротковолновые приближения. Понятия полного и дифференциального сечения рассеяния.

5.2. Приближение геометрической оптики. Понятие о лучах и лучевых трубках. Расчет амплитуды и фазы рассеянных волн на основании лучевых представлений. Ограничения метода геометрической оптики.

5.3. Принцип Гюйгенса-Френеля и основанные на нем приближенные методы решения дифракционных задач. Представление скалярного волнового поля в виде интеграла по поверхности (формула Кирхгофа). Приближение Кирхгофа в скалярных задачах дифракции.

5.4. Обобщение принципа Гюйгенса-Френеля на случай векторных полей. Поверхностные электрические и магнитные токи, эквивалентные тангенциальным компонентам полей на поверхности. Теорема единственности для монохроматических полей. Приближение Кирхгофа для векторного электромагнитного поля. Дифракция плоской волны на отверстии в экране и на дополнительном экране. Метод физической оптики (метод зеркальных токов) в задачах дифракции на проводящих телах больших размеров.

Лабораторный практикум, проводимый в рамках занятий дисциплины Б1.Б34

«Радиофизический практикум»:

1. Измерение импедансов нагрузок при помощи измерительной линии

2. Ферритовые устройства СВЧ диапазона

3. Измерение параметров шестиполосников
4. Исследование отражательного клистрона
5. Замедляющие системы типа гребенки

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

1. Виды самостоятельной работы:

- еженедельно к каждому практическому занятию студентам предлагается выполнить домашнее задание в виде практических задач.
- еженедельно текст каждой прочитанной лекции предлагается студентам для стимулирования самостоятельной внеаудиторной работы.

2. Порядок контроля выполнения самостоятельной работы:

- контроль выполнения домашнего задания проводится в рамках каждого практического занятия.
- в рамках каждого аудиторного занятия проводится контроль посещаемости.
- список вопросов для проведения промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

1. Гармонические волны в линиях передачи. Выражение для векторного потенциала.

Дифференциальное уравнение для поперечной волновой функции

. Понятия продольного и поперечного волнового числа. Выражения для полей ТЕ, ТМ и ТЕМ волн. Импедансная связь между поперечными компонентами электрического и магнитного полей и понятие поперечного волнового сопротивления в бегущей волне.

2. Граничные условия для поперечных волновых функций волн ТЕ, ТМ и ТЕМ типов в идеальной линии передачи. Математическая формулировка задачи описания волн ТЕ, ТМ и ТЕМ типов.

3. Дисперсионное уравнение для волн в идеальной линии передачи. Критические частоты и длины волн. Зависимости длины волны, фазовой и групповой скорости от частоты. Распространяющиеся и нераспространяющиеся волны.

4. Медленные волны, направляемые плоским диэлектрическим слоем. Дифференциальное уравнение для поперечной волновой функции и его решения для областей внутри и вне слоя. Выражения для полей, граничные условия и дисперсионные (характеристические) уравнения для симметричных и несимметричных волн типа ТМ.

5. Волны в прямоугольном металлическом волноводе. Спектр собственных функций и поперечных волновых чисел волн ТЕ и ТМ типов. Структура поля низших типов волн.

6. Волны в круглом металлическом волноводе. Спектр собственных функций и поперечных волновых чисел волн ТЕ и ТМ типов.

7. Главные (ТЕМ) волны в линиях передачи. Условие существования ТЕМ волны. ТЕМ волна в коаксиальной линии (картина силовых линий, зависимость полей от координат).

8. Телеграфные уравнения для идеальной линии. Погонные параметры линии. Волновое уравнение, общий вид его решения. Понятие волнового сопротивления линии в терминах тока и напряжения.

9. Отражение волны от нагрузки на конце линии передачи (в терминах тока и напряжения). Формула пересчета импеданса. Понятие согласования линии с нагрузкой.

10. Решение дисперсионного уравнения для симметричных и несимметричных волн, направляемых плоским диэлектрическим слоем, графическим методом; критические частоты; область существования единственной (низшей) моды.
11. Затухание волн в линии передачи, обусловленное потерями энергии в заполняющей среде.
12. Затухание волн в линии передачи, обусловленное потерями энергии в металлической стенке.
13. Собственные колебания в полном резонаторе, представляющем собой закороченный на концах отрезок линий передачи. Спектр собственных частот и низшая мода для полости прямоугольной формы.
14. Общая постановка задачи о собственных электромагнитных колебаниях в полых резонаторах с идеально проводящими стенками. Действительность собственных частот идеального резонатора.
15. Затухание собственных колебаний в полном металлическом резонаторе, обусловленное конечной проводимостью стенок.
16. Затухание собственных колебаний в полном резонаторе, обусловленное потерями энергии в заполняющей среде.
17. Лемма Лоренца и теорема взаимности для двух систем монохроматических источников.
18. Вывод соотношений ортогональности для волновых мод в линии передачи с помощью леммы Лоренца.
19. Представление полей в волноводе, созданных сторонними переменными токами, в виде разложений по собственным модам. Формулы для коэффициентов возбуждения.
20. Метод решения задачи о возбуждении идеального полого резонатора сторонними переменными токами. Потенциальные и вихревые поля. Ортогональность полей собственных мод.
21. Представление полей, создаваемых в резонаторе сторонними переменными токами в виде разложения по собственным модам резонатора. Формулы для коэффициентов возбуждения. Резонансные свойства.
22. Возбуждение резонатора с помощью штыря и петли.
23. Теорема об эквивалентности задания на границе области тангенциальных компонент полей и поверхностных токов
24. Понятия дифференциального и полного сечений рассеяния тела.
25. Кирхгофовское приближение (метод физической оптики) в задачах дифракции на идеально проводящих телах.
26. Метод геометрической оптики в задачах дифракции волн на рассеивающих объектах.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Тест) для оценки сформированности компетенции ОПК-1:

Задание 1.

Инструкция: установите соответствие.

Вид линии передачи	Волны, направляемые этими линиями
1. Пустая металлическая труба (волновод)	А. Быстрые ТЕ волны
2. Два параллельных провода в вакууме	Б. Медленные ТЕ волны
3. Плоский диэлектрический волновод	В. Быстрые ТМ волны
	Г. Медленные ТМ волны
	Д. Волна типа ТЕМ

1) 1БВ2АДЗГ

2) 1АВ2БГЗД

3) 1АВ2ДЗБГ

4) 1Д2АБЗВГ

Задание 2.

Инструкция: Расположите указанные ниже волновые моды квадратного металлического волновода в порядке возрастания их критической частоты.

А – волна TM_{11}

Б – волна TM_{12}

В – волна TE_{10}

Г – волна TE_{02}

1) ВАГБ

2) АБВГ

3) БАВГ

4) ВАБГ

Задание 3.

Инструкция: выберите все верные, по Вашему мнению, ответы.

В идеальном прямоугольном волноводе с размерами поперечного сечения $1 \times 2 \text{ см}^2$ при значении частоты $f = 2 \cdot 10^{10} \text{ Гц}$ могут распространяться волны следующих типов

- 1) TE_{10} 2) TM_{10} 3) TE_{11} 4) TE_{20} 5) TE_{30} 6) TE_{01} 7) TM_{11}

Задание 4

В каждом из предлагаемых ниже заданий выберите один (правильный по Вашему мнению) ответ из трех предлагаемых Вам вариантов:

1. Дисперсионное уравнение для волн в волноводе можно записать в виде

- 1) $k^2 = h^2 + \kappa^2$
2)
3)

Обозначения: h – длина волны в волноводе, κ – продольное волновое число, k – волновое число плоской волны в вакууме, κ – поперечное волновое число

2. Длина волны в прямоугольном волноводе с размерами поперечного сечения $a \times b$ равна

- 1) нулю
2)
3)

Обозначения: h – длина волны в волноводе, κ – продольное волновое число

3. Собственные колебания в прямоугольном резонаторе с внутренними размерами ребер (a, b) могут происходить только на частотах

1.
2.
3. на любых частотах

Здесь m, n – целые числа, одно из которых может быть равно нулю

4. Низшей модой прямоугольного волновода с размерами поперечного сечения $a \times b (a > b)$ является

- 1) TM_{111}
2) TE_{35}
3) TE_{10}

5. Волновое сопротивление линии передачи в терминах тока и напряжения равно

- 1) отношению амплитуды напряжения к амплитуде тока в бегущей волне
2) нулю
3) импедансу емкости

6. Коэффициент отражения от нагрузки на конце линии равен нулю, если

- 1) нагрузка согласована с линией

- 2) всегда
3) никогда

Критерии оценивания (оценочное средство - Тест)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	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 ИЛИ 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» ИЛИ 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» ИЛИ 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» ИЛИ 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»
не зачтено	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо» ИЛИ Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Контрольная работа) для оценки сформированности компетенции ОПК-2:

<p>1. Дисперсионное уравнение для низшей моды в пустом ($\varepsilon = \mu = 1$) прямоугольном волноводе с размерами поперечного сечения a и b ($a > b$) можно записать в виде</p> <p>1) $\lambda_g = \frac{2\pi}{\sqrt{(\omega/c)^2 - (\pi/a)^2}}$</p> <p>2) $h = \sqrt{(\omega/c)^2 - (\pi/b)^2}$</p> <p>3) $\lambda_g = 2\pi/h$</p> <p>4) $k = \omega/c$</p> <p>Обозначения: λ_g – длина волны в волноводе, h – продольное волновое число, k – волновое число плоской волны в вакууме</p>	<p>2. Что верно для главной (ТЕМ) волны в идеальной линии передачи без заполнения ($\varepsilon = \mu = 1$) ?</p> <p>1) Длина волны не зависит от частоты</p> <p>2) Продольное волновое число равно нулю</p> <p>3) Электрическое поле всюду параллельно магнитному</p> <p>4) Критическая частота равна нулю</p>
<p>3. Собственные колебания в прямоугольном резонаторе с внутренними размерами ребер a, b, d ($a > b > d$) могут происходить только на частотах</p> <p>1. $\omega_{mnp} = c\pi \sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}$</p> <p>2. $\omega_{mnp} = c\pi \sqrt{(m/b)^2 + (n/d)^2}$</p>	<p>4. Силовые линии электрического поля низшей моды прямоугольного резонатора с внутренними размерами a, b, d при условии $a > b > d$ представляют собой</p> <p>1) прямые, параллельные ребру a,</p> <p>2) замкнутые кривые, лежащие в плоскостях, перпендикулярных ребру d</p>

<p>3. $\omega_{mnp} = c\pi \sqrt{(m/a)^2 + (n/d)^2}$</p> <p>4. $\omega_{mnp} = c\pi \sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2 + (p/d)^2}$,</p> <p>Здесь m, n, p – целые числа, одно из которых может быть равно нулю</p>	<p>3) прямые, параллельные ребру d</p> <p>4) замкнутые кривые, лежащие в плоскостях, перпендикулярных ребру a</p>
<p>5. Волновое сопротивление линии передачи в терминах тока и напряжения равно отношению амплитуды напряжения в падающей волне к амплитуде тока</p> <p>1) в отраженной волне</p> <p>2) в падающей волне</p> <p>3) на входе линии</p> <p>4) через нагрузку</p>	<p>6. Коэффициент отражения от нагрузки на конце линии равен нулю, если импеданс нагрузки равен</p> <p>1) нулю</p> <p>2) бесконечности</p> <p>3) волновому сопротивлению</p> <p>4) половине волнового сопротивления</p>

Вариант №2.

<p>1. Дисперсионное уравнение для любой волны типа TM в пустом прямоугольном волноводе с размерами поперечного сечения a и b ($a > b$) можно записать в виде</p> <p>1) $\frac{\omega^2}{c^2} = h^2 + \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{b}\right)^2$</p> <p>2) $h = \sqrt{(\omega/c)^2 - (m\pi/a)^2 - (n\pi/b)^2}$</p> <p>3) $h = \sqrt{(\omega/c)^2 + (m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2}$</p> <p>4) $\frac{\omega^2}{c^2} = h^2 + \left(\frac{\pi}{a}\right)^2$</p> <p>Обозначения: h – продольное волновое число, ω – круговая частота, m, n, p – произвольные целые числа</p>	<p>2. Что не верно ?</p> <p>1) Поперечное волновое число низшей моды в пустом прямоугольном волноводе равно π/a, где a – больший размер поперечного сечения волновода.</p> <p>2) Фазовая скорость низшей моды в пустом прямоугольном волноводе больше скорости света c.</p> <p>3) Фазовая скорость волны типа ТЕМ в коаксиальной линии без диэлектрического заполнения не зависит от частоты.</p> <p>4) Поперечное волновое число ТЕМ волны в коаксиальной линии равно π/a, где a – радиус внешнего проводника.</p>
3. Собственная частота низшей моды	4. Поле низшей моды прямоугольного

<p>прямоугольного резонатора с внутренними размерами ребер a, b, d ($a > b > d$) равна</p> <ol style="list-style-type: none"> $\omega = c\pi / d$ $\omega = c\pi / \sqrt{a^2 + b^2}$ $\omega = c\pi \sqrt{(1/a)^2 + (1/b)^2}$ $\omega = c\pi / a$ 	<p>резонатора с внутренними размерами a, b, d при условии $a > b > d$</p> <ol style="list-style-type: none"> не зависит от координаты, параллельной ребру b не зависит от координаты, параллельной ребру d не зависит ни от одной из трех координат зависит от всех трех координат
<p>5. Отношение амплитуды напряжения к амплитуде тока в линии передачи в любом сечении линии</p> <ol style="list-style-type: none"> равно волновому сопротивлению линии, если коэффициент отражения от нагрузки на конце линии равен нулю равно волновому сопротивлению, если линия на конце закорочена (импеданс нагрузки равен нулю) равно волновому сопротивлению, если коэффициент отражения от нагрузки равен единице тождественно равно нулю, если линия на конце закорочена, т.е. импеданс нагрузки равен нулю 	<p>6. Коэффициентом отражения от нагрузки на конце линии передачи называется отношение</p> <ol style="list-style-type: none"> амплитуды напряжения на нагрузке к амплитуде напряжению на входе линии амплитуды напряжения на нагрузке к амплитуде силы тока через нагрузку отношение амплитуды напряжения в отраженной волне к амплитуде напряжения в падающей волне отношение амплитуды тока в отраженной волне к амплитуде напряжения в падающей волне

Вариант №3.

<p>1. Что верно для низшей моды прямоугольного волновода с размерами поперечного сечения a и b ($a > b$)?</p> <ol style="list-style-type: none"> Продольное волновое число равно $\sqrt{(\omega/c)^2 - (\pi/a)^2}$. Поперечное волновое число равно π/b. Электрическое и магнитное поля чисто поперечны. 	<p>2. Двумерное уравнение Гельмгольца $\Delta_c \psi + \kappa^2 \psi = 0$ для области, ограниченной замкнутым контуром L с заданным на нем граничным условием $\psi = 0$, имеет решение, не равное тождественно нулю,</p> <ol style="list-style-type: none"> при любом κ и любой форме контура L при дискретных значениях κ, зависящих от формы контура
---	---

4) Магнитное поле чисто поперечно.	3) при любой форме контура, если $\kappa=0$ 4) при любом κ , если контур имеет форму круга или прямоугольника
<p>3. Как изменяются собственные частоты всех мод полого резонатора с идеально проводящими стенками при его заполнении однородной средой с диэлектрической проницаемостью ϵ и магнитной проницаемостью μ?</p> <p>1. Увеличиваются в $\sqrt{\mu/\epsilon}$ раз.</p> <p>2. Увеличиваются в $\sqrt{\epsilon\mu}$ раз.</p> <p>3. Уменьшаются в $\sqrt{\epsilon\mu}$ раз.</p> <p>4. Не изменяются, если резонатор представляет собой отрезок волновода.</p>	<p>4. Объем внутри пустого прямоугольного резонатора ($0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b, 0 \leq z \leq L$) с размерами ребер $a < b < L$ ограничен идеально проводящими стенками. Зависимость компоненты поля E_x собственных колебаний низшей моды этого резонатора от времени t и координаты z:</p> <p>1. $E_x \sim \cos(\omega t) \exp(-\omega t) \sin(\pi z/L)$</p> <p>2. $E_x \sim \cos(\omega t - \pi z/L)$</p> <p>3. $E_x \sim \cos(\omega t) \cos(\pi z/L)$</p> <p>4. $E_x \sim \cos(\omega t) \sin(\pi z/L)$</p>
<p>5. Волновое сопротивление линии передачи в терминах тока и напряжения равно</p> <p>1) отношению амплитуды напряжения в падающей волне к амплитуде напряжения в отраженной волне</p> <p>2) отношению амплитуды напряжения в падающей волне к амплитуде тока в падающей волне</p> <p>3) отношению амплитуды напряжения в падающей волне к амплитуде тока в отраженной волне</p> <p>4) нулю, если линия изготовлена из идеальных проводников</p>	<p>6. Коэффициент отражения от нагрузки на конце линии равен нулю, если известно, что</p> <p>1) импеданс нагрузки равен нулю</p> <p>2) импеданс нагрузки равен бесконечности</p> <p>3) волна в линии является стоячей</p> <p>4) импеданс во всех поперечных сечениях линии равен волновому сопротивлению линии $Z_{\text{в}}$</p>

Вариант №4.

<p>1. Дисперсионное уравнение для любой волны типа TM в пустом прямоугольном волноводе с размерами поперечного сечения a и b ($a > b$) можно записать в виде</p>	<p>2. Что не верно ?</p> <p>1) Поперечное волновое число низшей моды в пустом прямоугольном волноводе равно π/a,</p>
---	---

$1) \frac{\omega^2}{c^2} = h^2 + \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{b}\right)^2$ $2) h = \sqrt{(\omega/c)^2 - (m\pi/a)^2 - (n\pi/b)^2}$ $3) h = \sqrt{(\omega/c)^2 + (m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2}$ $4) \frac{\omega^2}{c^2} = h^2 + \left(\frac{\pi}{a}\right)^2$ <p>Обозначения: h – продольное волновое число, ω – круговая частота, m, n, p – произвольные целые числа</p>	<p>где a – больший размер поперечного сечения волновода.</p> <p>2) Фазовая скорость низшей моды в пустом прямоугольном волноводе больше скорости света c.</p> <p>3) Фазовая скорость волны типа ТЕМ в коаксиальной линии без диэлектрического заполнения не зависит от частоты.</p> <p>4) Поперечное волновое число ТЕМ волны в коаксиальной линии равно π/a, где a – радиус внешнего проводника.</p>
<p>3. Собственная частота низшей моды прямоугольного резонатора с внутренними размерами ребер a, b, d ($a > b > d$) равна</p> $1. \omega = c\pi/d$ $2. \omega = c\pi/\sqrt{a^2 + b^2}$ $3. \omega = c\pi/a$ $4. \omega = c\pi\sqrt{(1/a)^2 + (1/b)^2 + (1/d)^2},$	<p>4. Поле низшей моды прямоугольного резонатора с внутренними размерами a, b, d при условии $a > b > d$</p> <p>1) не зависит от координаты, параллельной ребру b</p> <p>2) не зависит от координаты, параллельной ребру d</p> <p>3) не зависит ни от одной из трех координат</p> <p>4) зависит от всех трех координат</p>
<p>5. Отношение амплитуды напряжения к амплитуде тока в линии передачи в любом сечении линии</p> <p>1) равно волновому сопротивлению линии, если коэффициент отражения от нагрузки на конце линии равен нулю</p> <p>2) равно волновому сопротивлению, если линия на конце закорочена (импеданс нагрузки равен нулю)</p> <p>3) равно волновому сопротивлению, если коэффициент отражения от нагрузки равен</p>	<p>6. Коэффициентом отражения от нагрузки на конце линии передачи называется</p> <p>1) отношение напряжения на нагрузке к напряжению на входе линии</p> <p>2) отношение амплитуды напряжения на нагрузке к амплитуде силы тока через нагрузку</p> <p>3) отношение амплитуды тока в отраженной волне к амплитуде напряжения в падающей волне (обе величины определяются на конце линии)</p>

единице 4) тождественно равно нулю, если линия на конце закорочена, т.е. импеданс нагрузки равен нулю	4) отношение амплитуды напряжения в отраженной волне к амплитуде напряжения в падающей волне (обе величины определяются на конце линии)
--	---

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольная работа)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	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
отлично	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»
очень хорошо	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»
хорошо	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»
удовлетворительно	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»
неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения 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. Ошибок нет.	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 полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. 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 оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	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
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	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»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ОПК-1

1. Гармонические волны в линиях передачи. Выражение для векторного потенциала.

Дифференциальное уравнение для поперечной волновой функции $\psi(\vec{r}_\perp)$. Понятия продольного и поперечного волнового числа. Выражения для полей ТЕ, ТМ и ТЕМ волн. Импедансная связь между поперечными компонентами электрического и магнитного полей и понятие поперечного волнового сопротивления в бегущей волне.

2. Граничные условия для поперечных волновых функций волн ТЕ, ТМ и ТЕМ типов в идеальной линии передачи. Математическая формулировка задачи описания волн ТЕ, ТМ и ТЕМ типов.

3. Дисперсионное уравнение для волн в идеальной линии передачи. Критические частоты и длины волн. Зависимости длины волны, фазовой и групповой скорости от частоты. Распространяющиеся и нераспространяющиеся волны.

4. Волны в прямоугольном металлическом волноводе. Спектр собственных функций и поперечных волновых чисел волн ТЕ и ТМ типов. Структура поля низших типов волн.

5. Главные (ТЕМ) волны в линиях передачи. Условие существования ТЕМ волны. ТЕМ волна в коаксиальной линии (картина силовых линий, зависимость полей от координат).

6. Телеграфные уравнения для идеальной линии. Погонные параметры линии. Волновое уравнение, общий вид его решения. Понятие волнового сопротивления линии в терминах тока и напряжения.

7. Отражение волны от нагрузки на конце линии передачи (в терминах тока и напряжения). Формула пересчета импеданса. Понятие согласования линии с нагрузкой.

8.

7. Главные (ТЕМ) волны в линиях передачи. Условие существования ТЕМ волны. ТЕМ волна в коаксиальной линии (картина силовых линий, зависимость полей от координат).

8. Телеграфные уравнения для идеальной линии. Погонные параметры линии. Волновое уравнение, общий вид его решения. Понятие волнового сопротивления линии в терминах тока и напряжения.

9. Отражение волны от нагрузки на конце линии передачи (в терминах тока и напряжения). Формула пересчета импеданса. Понятие согласования линии с нагрузкой.

10. Собственные колебания в полном резонаторе, представляющем собой закороченный на концах отрезок линий передачи. Спектр собственных частот и низшая мода для полости прямоугольной формы.

11. Общая постановка задачи о собственных электромагнитных колебаниях в полых резонаторах с идеально проводящими стенками. Действительность собственных частот идеального резонатора.

12. Лемма Лоренца и теорема взаимности для двух систем монохроматических источников.

13. Вывод соотношений ортогональности для волновых мод в линии передачи с помощью леммы Лоренца.

14. Представление полей в волноводе, созданных сторонними переменными токами, в виде разложений по собственным модам. Формулы для коэффициентов возбуждения.

15. Метод решения задачи о возбуждении идеального полого резонатора сторонними переменными токами. Потенциальные и вихревые поля. Ортогональность полей собственных мод.

16. Представление полей, создаваемых в резонаторе сторонними переменными токами в виде разложения по собственным модам резонатора. Формулы для коэффициентов возбуждения. Резонансные свойства.

17. Возбуждение резонатора с помощью штыря и петли.

18. Понятия дифференциального и полного сечений рассеяния тела.

5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ОПК-2

1. Медленные волны, направляемые плоским диэлектрическим слоем. Дифференциальное уравнение для поперечной волновой функции и его решения для областей внутри и вне слоя. Выражения для полей,

граничные условия и дисперсионные (характеристические) уравнения для симметричных и несимметричных волн типа ТМ.

2. Волны в круглом металлическом волноводе. Спектр собственных функций и поперечных волновых чисел волн ТЕ и ТМ типов.

3. Решение дисперсионного уравнения для симметричных и несимметричных волн, направляемых плоским диэлектрическим слоем, графическим методом; критические частоты; область существования единственной (низшей) моды.

4. Затухание волн в линии передачи, обусловленное потерями энергии в заполняющей среде.

5. Затухание волн в линии передачи, обусловленное потерями энергии в металлической стенке.

6. Затухание собственных колебаний в полном металлическом резонаторе, обусловленное конечной проводимостью стенок.

7. Затухание собственных колебаний в полном резонаторе, обусловленное потерями энергии в заполняющей среде.

8. Теорема об эквивалентности задания на границе области тангенциальных компонент полей E_{τ}, H_{τ} и поверхностных токов $\vec{j}_{\text{пов}}^{(e)}, \vec{j}_{\text{пов}}^{(m)}$.

9. Кирхгофское приближение (метод физической оптики) в задачах дифракции на идеально проводящих телах.

10. Метод геометрической оптики в задачах дифракции волн на рассеивающих объектах.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	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
отлично	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»
очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом

Оценка	Критерии оценивания
	хотя бы одна компетенция сформирована на уровне « очень хорошо»
хорошо	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»
удовлетворительно	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»
неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Тест) для оценки сформированности компетенции ОПК-1

Тест для промежуточной аттестации соответствует тесту для текущего контроля

Критерии оценивания (оценочное средство - Тест)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	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
отлично	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»
очень хорошо	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»
хорошо	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»

Оценка	Критерии оценивания
удовлетворительно	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»
неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Никольский Вячеслав Владимирович. Электродинамика и распространение радиоволн : [учеб. пособие для радиотехн. специальностей вузов]. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Наука, 1989. - 543 с. : ил. - ISBN 5-02-014033-3 (в пер.) : 1.60., 155 экз.
2. Вайнштейн Лев Альбертович. Электромагнитные волны. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Радио и связь, 1988. - 440 с. : ил. - ISBN 5-256-00064-0 (в пер.) : 2.90., 225 экз.
3. Баскаков Святослав Иванович. Основы электродинамики : [учеб. пособие для радиотехн. специальностей вузов]. - М. : Советское радио, 1973. - 248 с. : с черт. - 0.54., 20 экз.
4. Гольдштейн Лев Давидович. Электромагнитные поля и волны. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Советское радио, 1971. - 662 с. : ил. - 2.25., 25 экз.
5. Сборник задач по электродинамике / Гильденбург В.Б., Миллер М.А. - Москва : Физматлит, 2001., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=645545&idb=0>.

Дополнительная литература:

1. Джексон Джон. Классическая электродинамика / пер. с англ. Г. В. Воскресенского и Л. С. Соловьева ; под ред. Э. Л. Бурштейна. - М. : Мир, 1965. - 702 с. : черт. - 2.95., 23 экз.
2. Батыгин Владимир Владимирович. Сборник задач по электродинамике и специальной теории относительности : учеб. пособие. - Изд. 4-е, перераб. - СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2010. - 480 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-0921-1 : 728.20., 40 экз.
3. Батыгин В. В. Сборник задач по электродинамике и специальной теории относительности / Батыгин В. В., Топтыгин И. Н. - 4-е изд. - Санкт-Петербург : Лань, 2022. - 480 с. - Книга из коллекции Лань - Физика. - ISBN 978-5-8114-0921-1., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=799674&idb=0>.
4. Терлецкий Яков Петрович. Электродинамика : [учеб. пособие для физ. специальностей ун-тов]. - М. : Высшая школа, 1980. - 335 с. : ил. - 0.95., 13 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

-

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

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 03.03.03 - Радиофизика.

Автор(ы): Гильденбург Владимир Борисович, доктор физико-математических наук, профессор.

Рецензент(ы): Гавриленко Владимир Георгиевич, доктор физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Кудрин Александр Владимирович, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 18 декабря 2023 г., протокол № 09/23.