

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

Линии передачи и резонаторы

Уровень высшего образования

Специалитет

Направление подготовки / специальность

11.05.02 - Специальные радиотехнические системы

Направленность образовательной программы

Радиотехнические системы и комплексы специального назначения

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.01.01 Линии передачи и резонаторы относится к части, формируемой участниками образовательных отношений 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
ПК-2: Способен проводить математическое и компьютерное моделирование, моделирование, а также экспериментальные исследования объектов и процессов в целях анализа и оптимизации параметров радиоэлектронных средств и апробации перспективных технических решений	<p>ПК-2.1: Понимает основы моделирования и компьютерного проектирования радиоэлектронных средств, стандартные пакеты прикладных программ, ориентированных на решение научных и проектных задач радиоэлектроники</p> <p>ПК-2.2: Понимает математические модели процессов и явлений, лежащих в основе принципов действия радиоэлектронных средств</p> <p>ПК-2.3: Применяет компьютерные системы и пакеты прикладных программ для проектирования и моделирования радиоэлектронных средств</p> <p>ПК-2.4: Проводит экспериментальные исследования в целях анализа и оптимизации параметров радиоэлектронных средств и апробации перспективных технических решений</p>	<p>ПК-2.1:</p> <p>Знать основные свойства и параметры линий передачи и резонаторов</p> <p>Уметь систематизировать знания и сопоставлять различные физические явления теоретическому описанию</p> <p>Владеть навыками использования основных разделов электродинамики волноводов и резонаторов при решении практических задач</p> <p>ПК-2.2:</p> <p>Знать основные методы математического анализа и моделирования физических явлений</p> <p>Уметь анализировать физические аспекты теории и возможности ее использования для моделирования волновых процессов в целях анализа и оптимизации их параметров</p> <p>Владеть навыками решения профессиональных задач проектирования линий передачи и резонаторов, а также моделирования происходящих в них процессов</p> <p>ПК-2.3:</p> <p>Знать основные методы описания процессов,</p>	Тест	<p>Зачёт:</p> <p>Контрольные вопросы</p> <p>Задачи</p>

		<p>происходящих в линиях передачи и резонаторах</p> <p>Уметь выполнять моделирование процессов, происходящих в линиях передачи и резонаторах</p> <p>Владеть навыками анализа и расчета характеристик радиотехнических цепей, аналоговых и цифровых узлов</p> <p>ПК-2.4:</p> <p>Знать различные методы исследования распространения электромагнитных волн в линиях передачи и электромагнитных колебаний в резонаторах</p> <p>Уметь использовать имеющиеся средства исследований для решения стандартных задач электродинамики</p> <p>Владеть навыками решения профессиональных задач анализа и оптимизации параметров линий передач и резонаторов</p>		
--	--	---	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	3
Часов по учебному плану	108
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	32
- КСР	1
самостоятельная работа	43
Промежуточная аттестация	0
	Зачёт

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/ лабора- торные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
Введение	3	2	0	2	1
Электромагнитные волны, в направляющих системах (линиях передачи)	44	16	8	24	20
Собственные колебания в полых резонаторах	24	6	8	14	10
Возбуждение волноводов и резонаторов заданными источниками	16	4	8	12	4
Медленные волны	10	2	4	6	4
Элементы теории дифракции электромагнитных волн на металлических и диэлектрических телах	10	2	4	6	4
Аттестация	0				
КСР	1				1
Итого	108	32	32	65	43

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 запираания. 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.

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. Медленные волны.

5.1. 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.

Раздел 6. Элементы теории дифракции электромагнитных волн.

6.1. 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.

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

6.3. 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.

6.4. 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:

1. Измерение импедансов нагрузок при помощи измерительной линии
2. Ферритовые устройства СВЧ диапазона
3. Измерение параметров шестиполусников
4. Исследование отражательного клистрона
5. Замедляющие системы типа гребенки
6. Электромагнитное экранирование
7. Рупорная антенна
8. Спиральная волноводно-щелевая антенна с частотным качанием луча

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

На проведение практических занятий / лабораторных работ в форме практической подготовки отводится: очная форма обучения - 16 ч.

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. Задачи по электродинамике. Составители: Гильденбург В.Б., Зайцева А.С., Юрасова Н.В.: Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2018. – 53 с.
2. Гильденбург В.Б., Суворов Е.В.: Основы электродинамики. Учебное пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский университет, 2017 – 113 с.

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 ПК-2:

<p>1. Дисперсионное уравнение для волн в волноводе можно записать в виде</p> <p>1) $k^2 = h^2 + \kappa^2$</p> <p>2) $\lambda_g = 2\pi / h$</p> <p>3) $k = \omega / c$</p> <p>Обозначения: λ_g – длина волны в волноводе, h – продольное волновое число, k – волновое число плоской волны в вакууме, κ – поперечное волновое число</p>	<p>2. Длина волны в прямоугольном волноводе с размерами поперечного сечения $a \times b$ равна</p> <p>1) нулю</p> <p>2) $\lambda_g = 2\pi / h$</p> <p>3) $\lambda_g = 2\pi / a$</p> <p>Обозначения: λ_g – длина волны в волноводе, h – продольное волновое число</p>
---	---

Критерии оценивания (оценочное средство - Тест)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибки. Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме. Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами.
не зачтено	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.

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	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельным и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продемонстрированы 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 некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован 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 ПК-2

1. Общие свойства волн в линиях передачи с идеально проводящими границами. Спектр поперечных волновых чисел. Дисперсионные уравнения. Режимы распространения и запираания. Критические частоты.
2. Линии передачи с идеально проводящими границами. 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.
3. Классификация направляемых волн и линий передачи. Волны типов ТЕ, ТМ и ТЕМ; гибридные волны; быстрые и медленные волны; открытые и закрытые линии передачи.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибки. Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме. Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами.
не зачтено	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.

5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ПК-2

Задача 1.

Указать самый низкий тип колебаний и найти его собственную частоту для цилиндрического резонатора с высотой d и радиусом a в двух случаях: а) $d \gg a$; б) $d \ll a$.

Задача 2.

Где и как следует прорезать измерительную щель в прямоугольном волноводе, в котором возбуждена волна ТЕ₀₁? Размеры поперечного сечения волновода $a \times b$ ($a > b$).

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибки. Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме. Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами.
не зачтено	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки. При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки.

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. Ландау Лев Давидович. Теоретическая физика : учеб. пособие для студентов физ. специальностей ун-тов : в 10 т. Т. 8. Электродинамика сплошных сред / под ред. Л. П. Питаевского. - 4-е изд., стер. - М. : Физматлит, 2003. - 656 с. - ISBN 5-9221-0123-4 (т. 8). - ISBN 5-9221-0053-X : 256.00., 2 экз.
4. Баскаков Святослав Иванович. Основы электродинамики : [учеб. пособие для радиотехн. специальностей вузов]. - М. : Советское радио, 1973. - 248 с. : с черт. - 0.54., 20 экз.
5. Гольдштейн Лев Давидович. Электромагнитные поля и волны. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Советское радио, 1971. - 662 с. : ил. - 2.25., 25 экз.
6. Гильденбург Владимир Борисович. Сборник задач по электродинамике : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по физ. направлениям и специальностям. - Изд. 2-е, доп. - М. : Физматлит, 2001. - 168 с. - ISBN 5-9221-0113-7 : 60.00., 229 экз.

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. Пановский В. Классическая электродинамика / пер. с англ. В. П. Быкова ; под ред. С. П. Капицы. - М. : Физматгиз, 1963. - 432 с. : черт. - 1.49., 4 экз.
3. 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.
4. Терлецкий Яков Петрович. Электродинамика : [учеб. пособие для физ. специальностей ун-тов]. - 2-е изд., перераб. - М. : Высшая школа, 1990. - 351, [1] с. : ил. - ISBN 5-06-001543-2 (в пер.) :

1.00., 4 экз.

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

Не предусмотрено.

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 11.05.02 - Специальные радиотехнические системы.

Автор(ы): Еськин Василий Алексеевич, кандидат физико-математических наук.

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 16.01.2024 г., протокол № №1.