

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Радиофизический факультет  
(факультет / институт / филиал)

---

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

**Рабочая программа дисциплины**

Линии передачи и резонаторы  
(наименование дисциплины (модуля))

---

Уровень высшего образования  
специалитет  
(бакалавриат / магистратура / специалитет)

---

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

---

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

---

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

---

Нижегород

2023 год

## 1. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина Б1.В.ДВ.01.01 «Линии передачи и резонаторы» относится к части ООП направления подготовки 11.05.02 Специальные радиотехнические системы, формируемой участниками образовательных отношений.

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

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	
<b>ПК-2</b>  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	<b>ПК-2.1. Понимает основы моделирования и компьютерного проектирования радиоэлектронных средств, стандартные пакеты прикладных программ, ориентированных на решение научных и проектных задач радиоэлектроники.</b>	Знать основные свойства и параметры линий передачи и резонаторов Уметь систематизировать знания и сопоставлять различные физические явления теоретическому описанию Владеть навыками использования основных разделов электродинамики волноводов и резонаторов при решении практических задач	Задача (практическое задание), собеседование
	<b>ПК-2.2 Понимает математические модели процессов и явлений, лежащих в основе принципов действия радиоэлектронных средств</b>	Знать основные методы математического анализа и моделирования физических явлений Уметь анализировать физические аспекты теории и возможности ее использования для моделирования волновых процессов в целях анализа и оптимизации их параметров Владеть навыками решения профессиональных задач проектирования линий передачи и резонаторов, а также моделирования происходящих в них процессов	Задача (практическое задание), собеседование
	<b>ПК-2.3 Применяет компьютерные системы и пакеты прикладных программ для проектирования и моделирования радиоэлектронных</b>	Знать основные методы описания процессов, происходящих в линиях передачи и резонаторах Уметь выполнять моделирование процессов, происходящих в линиях передачи и резонаторах	Задача (практическое задание), собеседование

	<i>средств.</i>	<i>Владеть</i> навыками анализа и расчета характеристик радиотехнических цепей, аналоговых и цифровых узлов	
	<i>ПК-2.4. Проводит экспериментальные исследования в целях анализа и оптимизации параметров радиоэлектронных средств и апробации перспективных технических решений</i>	<i>Знать</i> различные методы исследования распространения электромагнитных волн в линиях передачи и электромагнитных колебаний в резонаторах <i>Уметь</i> использовать имеющиеся средства исследований для решения стандартных задач электродинамики <i>Владеть</i> навыками решения профессиональных задач анализа и оптимизации параметров линий передач и резонаторов	Задача (практическое задание), собеседование

### 3. Структура и содержание дисциплины

#### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	<b>очная форма обучения</b>
<b>Общая трудоемкость</b>	<b>3 ЗЕТ</b>
<b>Часов по учебному плану</b>	<b>108</b>
<b>в том числе</b>	
<b>аудиторные занятия (контактная работа):</b>	
- занятия лекционного типа	<b>32</b>
- занятия семинарского типа	<b>16</b>
- лабораторные работы	<b>16</b>
<b>самостоятельная работа</b>	<b>43</b>
<b>КСР</b>	<b>1</b>
<b>Промежуточная аттестация – зачет</b>	

### 3.2. Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе																
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них														Самостоятельная работа обучающегося, часы		
		Занятия лекционного типа				Занятия семинарского типа			Занятия лабораторного типа			Всего						
	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная	Очная	Очно-заочная	Заочная
Введение	3			2			-			-			2			1		
Электромагнитные волны, в направляющих системах (линиях передачи)	52			16			8			8			32			20		
Собственные колебания в полых резонаторах	24			6			4			4			14			10		
Возбуждение волноводов и резонаторов заданными источниками	13			4			5			-			9			4		
Медленные волны	10			2			-			4			6			4		
Элементы теории дифракции электромагнитных волн на металлических и диэлектрических телах	6			2			-			-			2			4		
Промежуточная аттестация – Зачет																		
Итого	108			32			17			16			65			43		

Содержание разделов 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

№ п/п	Наименование лабораторной работы
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
6.	Электромагнитное экранирование
7.	Рупорная антенна
8.	Спиральная волноводно-щелевая антенна с частотным качанием луча

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

Практическая подготовка предусматривает: решение практических заданий и задач, организация семинаров по отдельным разделам дисциплины, а также проведение эксперимента в рамках лабораторной работы.

На проведение практических занятий (семинарских и лабораторных занятий) в форме практической подготовки отводится 32 часа.

Практическая подготовка направлена на формирование и развитие:

- практических навыков в соответствии с профилем ОП:

Математическое и компьютерное моделирование радиоэлектронных устройств и систем с целью оптимизации (улучшения) их параметров

- компетенций: ПК-2.

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

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

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

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

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

включающий:

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

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	Шкала оценивания сформированности компетенций						
	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено		зачтено				
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок.	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько незначительных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность	При решении стандартных задач не продемонстрировано	Продemonстрированы основные умения.	Продemonстрированы все основные умения.	Продemonстрированы все основные умения.	Продemonстрированы все основные умения, реше	Продemonстрированы все основные умения,.

	ть оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	ированы основные умения.  Имели место грубые ошибки.	Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания но не в полном объеме.	Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Решены все основные задачи . Выполнены все задания, в полном объеме, но некоторые с недочетами.	ны все основные задачи с отдельными несущественным недочетами, выполнены все задания в полном объеме.	Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие владения материалом. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки.  Имели место грубые ошибки.	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки  при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки  при решении стандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрированы навыки  при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов.	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценки при промежуточной аттестации

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



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

### 5.2.1 Контрольные вопросы

вопросы	Код формируемой компетенции
1. Общие свойства волн в линиях передачи с идеально проводящими границами. Спектр поперечных волновых чисел. Дисперсионные уравнения. Режимы распространения и запираания. Критические частоты.	ПК-2
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.	ПК-2
3. Классификация направляемых волн и линий передачи. Волны типов ТЕ, ТМ и ТЕМ; гибридные волны; быстрые и медленные волны; открытые и закрытые линии передачи.	ПК-2
4. Прямоугольный волновод. Дисперсионное соотношение, критические частоты и длины волн. Структура поля волн низших типов. Представление полей волновых мод в виде суперпозиции плоских волн в свободном пространстве (концепция Бриллюэна).	ПК-2
5. Критическая частота и критическая длина волны прямоугольного волновода с поперечным сечением $a \times b$ .	ПК-2
6. Изобразить силовые линии электрического и магнитного полей основной моды коаксиального волновода. Критическая частота этой моды.	ПК-2
7. Круглый волновод. Дисперсионное соотношение, критические частоты и длины волн. Структура поля волн низших типов.	ПК-2
8. 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.	ПК-2
9. Затухание волн в неидеальной линии передачи. Потери энергии в среде, заполняющей волновод. Потери энергии в стенках волновода.	ПК-2
10. Резонаторы, представляющие собой отрезки линий передачи. Структура поля и спектры собственных частот колебаний в прямоугольном и цилиндрическом резонаторах.	ПК-2
11. Затухание собственных колебаний в резонаторах. Расчет декрементов затухания, обусловленного потерями энергии в заполняющей среде и в стенках резонатора. Добротность колебаний.	ПК-2
12. 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. Формулы возбуждения волноводов.	ПК-2

13. Вынужденные электромагнитные колебания, возбуждаемые сторонними монохроматическими токами в полых резонаторах. Вихревые и потенциальные поля. Разложение вихревых полей по собственным модам резонатора. Формулы возбуждения резонаторов.	ПК-2
14. Поверхностная волна. Структура поля, фазовая скорость поверхностной волны. Способ её возбуждения.	ПК-2
15. Линии передачи, направляющие медленные (поверхностные) волны. Классификация замедляющих систем. Волны в диэлектрическом слое.	ПК-2
16. Понятия дифференциального и полного сечений рассеяния тела.	ПК-2
17. Метод геометрической оптики в задачах дифракции волн на рассеивающих объектах.	ПК-2

### 5.2.2. Типовые задания/задачи для оценки сформированности компетенции ПК-2

#### Задача 1.

В прямоугольном волноводе с поперечным сечением  $a \times b$  ( $a > b$ ), заполненном диэлектриком с проницаемостями  $\epsilon$  и  $\mu$ , распространяется низшая мода с частотой  $\omega$ . Найти критическую частоту, длину волны в волноводе, фазовую скорость и волновое сопротивление.

## 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### а) основная литература:

1. Никольский В. В., Никольская Т. И. - Электродинамика и распространение радиоволн: [учеб. пособие для радиотехн. специальностей вузов]. - М.: Наука, 1989. - 543 с.
2. Вайнштейн Л. А. - Электромагнитные волны. - М.: Радио и связь, 1988. - 440 с.
3. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Т.8 Электродинамика сплошных сред. [Электронный ресурс] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — Электрон. дан. — М. : Физматлит, 2005. — 656 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/2234> — Загл. с экрана.
4. Баскаков С. И. - Основы электродинамики: [учеб. пособие для радиотехн. специальностей вузов]. - М.: Советское радио, 1973. - 248 с.
5. Гольдштейн Л. Д., Зернов Н. В. - Электромагнитные поля и волны. - М.: Советское радио, 1971. - 662 с.
6. Гильденбург, В.Б. Сборник задач по электродинамике. [Электронный ресурс] / В.Б. Гильденбург, М.А. Миллер. — Электрон. дан. — М. : Физматлит, 2001. — 163 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/48209> — Загл. с экрана.

### б) дополнительная литература:

1. Джексон Д. - Классическая электродинамика. - М.: Мир, 1965. - 702 с.
2. Пановский В., Филипс М - Классическая электродинамика. - М.: Физматгиз, 1963. - 432 с.

3. Батыгин, В.В. Сборник задач по электродинамике и специальной теории относительности. [Электронный ресурс] / В.В. Батыгин, И.Н. Топтыгин. — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2010. — 480 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/544> — Загл. с экрана.
4. Терлецкий Я. П., Рыбаков Ю. П. - Электродинамика: [учеб. пособие для физ. специальностей ун-тов]. - М.: Высшая школа, 1990. - 351, [1] с.

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

Помещения представляют собой учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных программой, оснащенные оборудованием и техническими средствами обучения: наборы демонстрационного оборудования и учебно-наглядных пособий, обеспечивающие тематические иллюстрации, соответствующие программе дисциплины.

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

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

Авторы: к.ф.-м.н. А.С. Зайцева

Рецензент: д.ф.-м.н., проф. В.Г. Гавриленко

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

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