

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**Саровский физико-технический институт -**

филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
(СарФТИ НИЯУ МИФИ)

«УТВЕРЖДАЮ»

Декан физико-технического фа-  
культета СарФТИ НИЯУ МИФИ

\_\_\_\_\_ А.К.Чернышев  
«...» \_\_\_\_\_ 2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**Физика и техника сверхвысоких частот**

Направление подготовки (специальность) **03.04.01 Прикладная математика и физика**

Профиль подготовки **Физика фундаментальных взаимодействий**

Квалификация (степень) выпускника **магистр**  
(бакалавр, магистр, специалист)

Форма обучения **очная**  
(очная, очно-заочная (вечерняя), заочная)

Автор \_\_\_\_\_ М.Л. Сметанин

Рецензент \_\_\_\_\_ к.ф.-м.н. А.В. Тельнов

**Согласовано:**

Зав. кафедрой ЯРФ \_\_\_\_\_ д.ф.-м.н. Н.В. Завьялов

Руководитель ОПП \_\_\_\_\_ д.ф.-м.н. Н.В. Завьялов

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО и ОС НИЯУ МИФИ (актуализирован  
Ученым советом университета, Протокол №21/11 от 27.07.2021 г)

Программа одобрена  
на заседании кафедры Ядерной и радиационной физики  
от 31.08.21 (протокол №2).

г. Саров, 2021 г.

## ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

### 1.1. Цель изучения дисциплины:

- в области обучения – изучение основ теории классической макроскопической электродинамики, электромагнитных явлений, происходящих в различных средах и при распространении волн, ознакомление с физическими принципами распространения волн СВЧ, работы СВЧ трактов и составляющих их элементов, основными закономерностями процессов в различных типах вакуумных и твердотельных СВЧ приборов, а также конструкциями различных СВЧ приборов и устройств. Формирование у будущих специалистов специальных знаний, умений, навыков расчета и проектирования, а также компетенций в области разработки и эксплуатации современных компонентов и устройств СВЧ техники, в частности, формирование современных знаний в области источников ВЧ и СВЧ питания, а так же ускоряющих систем резонансных ускорителей заряженных частиц;
- в области воспитания – научить эффективно работать индивидуально и в команде, проявлять умения и навыки, необходимые для профессионального, личностного развития;
- в области развития – подготовка студентов к дальнейшему освоению новых профессиональных знаний и умений, самообучению, непрерывному профессиональному совершенствованию.

### 1.2. Задачи дисциплины:

- представление основополагающей информации по физике и технике ВЧ и СВЧ диапазона. ВЧ и СВЧ генераторных устройств, в частности современным и проектируемым резонансным ускорителям заряженных частиц.
- описание физических основ работы ускоряющих систем резонансных ускорителей заряженных частиц, методов измерения их ВЧ и СВЧ электродинамических характеристик.
- освещение вопросов обеспечения безопасности при работах с элементами СВЧ техники.
- демонстрация резонансных электронных ускорителей РФЯЦ-ВНИИЭФ.
- стимулировать развитие способности к самостоятельному поиску и обработке научной информации.

## 2 МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Курс «Физика и техника сверхвысоких частот» изучается студентами на 1 и 2 курсах магистратуры (2 и 3 семестры обучения) и дает представление об основных понятиях физики и техники СВЧ, генерации электромагнитных колебаний СВЧ диапазона, способах передачи СВЧ мощности на расстояние, элементах волноводной техники, о мерах по обеспечению безопасного проведения измерений на СВЧ, безопасной эксплуатации генераторов СВЧ, а также знакомит студентов с системами СВЧ и ВЧ питания резонансных ускорителей электронов, работающих в РФЯЦ-ВНИИЭФ. Курс базируется на следующих дисциплинах: математический анализ, физика, электродинамика, теория функции комплексного переменного, теоретические основы электротехники.

### **3 КОМПЕТЕНЦИИ СТУДЕНТА, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ. ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАЗОВАНИЯ, КОМПЕТЕНЦИИ СТУДЕНТА ПО ЗАВЕРШЕНИЮ ОСВОЕНИЯ ПРОГРАММЫ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

В совокупности с другими дисциплинами курс «Физика и техника сверхвысоких частот» направлен на формирование следующих компетенций магистра:

- ПК-3- способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием, приборами и установками в избранной предметной области в соответствии с целями программы специализированной подготовки магистра;

- ПК-13.1- способен к обеспечению безопасности при проведении работ на ядерно-физических и электрофизических установках, с делящимися материалами, радиоактивными веществами и радиоактивными отходами;

- ПК-13.2- способен к проведению испытаний согласно техническим требованиям, анализу характеристик испытываемого изделия, а также к подготовке аналитической документации испытаний

Студент должен будет:

#### **Знать:**

3-ПК-3 Знать основные методы исследований, принципы работы приборов и установок в избранной предметной области

3-ПК-13.1 федеральные нормы и правила, отраслевые нормативные документы по ядерной и радиационной безопасности, электробезопасности и охране труда при эксплуатации исследовательских ядерных и электрофизических установок – источников излучения, высоковольтного и измерительного оборудования; технические характеристики установок и оборудования; технологические регламенты безопасной эксплуатации установок и оборудования

3-ПК-13.2 Метрологию, стандартизацию и сертификацию в атомной отрасли, методы и средства автоматизации выполнения испытаний; порядок разработки и оформления технологической, методической документации для подготовки и проведения испытаний, отчетной документации по результатам выполненных исследований

#### **В том числе:**

- основные термины, определения и единицы системы измерений в техники СВЧ;
- линии передачи СВЧ сигнала и природу его распространения в этих линиях;
- основные принципы и методы построения структуры трактов передачи СВЧ мощности;
- основные типы приборов СВЧ и принципы их функционирования;
- основные типы резонансных ВЧ и СВЧ структур;
- методы и средства измерений, проводимых на СВЧ;

#### **Уметь:**

У-ПК-3 Уметь выбирать необходимые технические средства для проведения экспериментальных исследований в избранной предметной области, обрабатывать полученные экспериментальные результаты

У-ПК-13.1 анализировать научно-техническую информацию по теме исследований, в том числе для организации контроля за техническим состоянием установок и оборудования; средств измерений, контроля, управления и автоматики, обеспечивающих безопасную эксплуатацию установок и стендов

У-ПК-13.2 Оценивать научно-технический уровень достигнутых результатов

**В том числе:**

- обоснованно выбирать параметры элементов СВЧ устройств;
- производить оценки области применимости различных СВЧ устройств и определять их характеристики;
- пользоваться справочной и технической документацией;

**Владеть:**

В-ПК-3 Владеть навыками работы с исследовательским и испытательным оборудованием, приборами и установками в избранной предметной области

В-ПК-13.1 навыками разработки планов перспективных исследований по инновационным ядерным технологиям и мероприятий по обеспечению ядерной безопасности планируемых работ

В-ПК-13.2 навыками анализа и обобщения результатов выполненных научно-технических исследований и разработок, включая разработку методик выполнения измерений, испытаний и контроля работоспособности основных подсистем и узлов испытательного оборудования и применяемых средств измерений; а также анализ результатов, полученных в результате испытаний изделий (объектов испытания)

**В том числе:**

- практическими навыками решения задач по физике и технике СВЧ;
- приемами расчёта передающих линий, устройств СВЧ, объемных резонаторов;
- навыками ведения дискуссий при защите научно-технических работ.

**В результате изучения дисциплины студент должен получить комплексную систему знаний о физике и технике СВЧ:**

- **Знание и понимание физики и техники СВЧ устройств** (теория возбуждения СВЧ электромагнитных колебаний, способы передачи СВЧ мощности, направляющие и резонаторные структуры СВЧ, основные способы согласования, деления мощности, ослабления СВЧ сигналов)
- **Основные представления о генераторных и усилительных приборах СВЧ** (классификация СВЧ приборов, принципы функционирования магнетронов, клистронов, ЛБВ, усилительных и генераторных триодов и тетродов, работающих в диапазонах ВЧ и СВЧ)

- **Практические навыки измерений проводимых на СВЧ** (методы измерения проходящей мощности, коэффициентов отражения и КСВН, входных сопротивлений линий передачи).
- **Техника безопасности** (действие СВЧ излучения на человека, основные определения техники безопасности при работе с СВЧ устройствами)

#### 4 СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина изучается студентами на 2 - 3 семестрах обучения по ООП.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 72 часа, из них 64 часа аудиторная нагрузка, 18 часов занятия в интерактивной форме, 8 часов СРС.

2 семестр - 16 часов – лекции, 16 часов – практики (включая 10 часов в интерактивной форме), 4 часа - СРС

3 семестр - 16 часов – лекции, 16 часов – практики (включая 8 часов в интерактивной форме), 4 часа - СРС

Таблица 1 – Календарно-тематический план занятий и контроля. 2 семестр

| Раздел учебной дисциплины  | Недели | Виды учебной деятельности |               |                               | Текущий контроль успеваемости | Аттестация раздела | Максимальный балл за раздел |
|--|--------|---------------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|
|  |        | Лекции, час               | Практика, час | Самост. раб./Нед./час         |                               |                    |                             |
| <b>1. Общие сведения из теории электромагнитного поля</b>  |        |                           |               |                               |                               |                    |                             |
| Вводная лекция.  | 1      | 1                         |               |                               |                               | зачет              |                             |
| Уравнения Максвелла и теория электромагнитного поля.   |        | 1                         |               | Подготовка к дискуссии /1нед/ |                               | зачет              |                             |
| <b>Дискуссия по теме:</b> Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной форме.                   | 2      |                           | 2             |                               | УО, Д                         | зачет              | Д - 5                       |
| Классификация сред на проводники, диэлектрики и полупроводники.  | 3      | 2                         |               | Подготовка к дискуссии /3нед/ |                               | зачет              |                             |
| <b>Дискуссия по теме:</b> Классификация сред. Закон Ома. Закон Ампера.                                   | 4      |                           | 2             |                               | УО, Д                         | зачет              | Д - 5                       |
| <b>2. Принцип суперпозиции и понятие волнового процесса</b>  |        |                           |               |                               |                               |                    |                             |
| Принцип суперпозиции и линейная однородная среда без сторонних токов в переменном электромагнитном поле. | 5      | 2                         |               | Подготовка к дискуссии /5нед/ |                               | зачет              |                             |

|  |    |    |    |   |       |       |           |
|--|----|----|----|---|-------|-------|-----------|
| Дискуссия по теме: Принцип суперпозиции. Волновые уравнения Гельмгольца для векторов E и H.                            | 6  |    | 2  |   | УО, Д | зачет | Д - 5     |
| Однородная плоская волна в неограниченной однородной линейной среде  | 7  | 2  |    | Подготовка к дискуссии /7нед/   |       | зачет |           |
| Дискуссия по теме: Однородная плоская волна. Прямая и обратная волны. Фазовая скорость волны.                          | 8  |    | 2  |   | УО, Д | зачет | Д - 5     |
| <b>3. Волны в различных неограниченных средах.</b>   |    |    |    |   |       |       |           |
| Волны в диэлектрике.   | 9  | 2  |    | Подготовка к дискуссии /9нед/3час, Работа по написанию реферата /9-16нед/ |       | зачет |           |
| Дискуссия по теме: Волны в диэлектрике. Сложение волн. Стоячая и бегущая волны.  | 10 |    | 2  |   | УО, Д | зачет | Д - 5     |
| Волны в проводнике. Анизотропия. Понятие гиротропной среды. Общая характеристика распространения волны в таких средах. | 11 | 2  |    | Подготовка к КР/11нед/  |       | зачет |           |
| <b>КР-1 по разделам 1- 3</b>   | 12 |    | 2  |   | КР    |       | 5         |
| <b>4. Волновые процессы на границах раздела сред.</b>  |    |    |    |   |       |       |           |
| Явления на плоской границе раздела двух сред Явления при нормальном падении.   | 13 | 2  |    | Подготовка к практическому занятию /13нед/                                |       | зачет |           |
| <b>Практическое занятие:</b> обсуждение вопросов и решение задач по разделам 1-4                                       | 14 |    | 2  |   | УО    | зачет | 5         |
| Явления при наклонном падении на границу диэлектрик-металл. Типы и параметры направляемых волн                         | 15 | 2  |    |   |       | зачет |           |
| Защита рефератов по предложенным темам   | 16 |    | 2  |   |       | зачет | <b>10</b> |
| Зачет  | 17 |    |    |   |       |       |           |
| Итого  | 17 | 16 | 16 | 4   |       |       |           |
| <b>Бально-рейтинговая система (максимальное количество баллов за семестр)</b>  |    |    |    |   |       |       |           |
| Посещаемость   |    |    |    |   |       |       | 5         |

|   |  |  |  |  |  |     |
|---|--|--|--|--|--|-----|
| Кол-во баллов за работу в семестре:<br>1 КР – 5 баллов;<br>5 Д – 25 баллов;<br>Р – 10 баллов<br>УО – 5 баллов |  |  |  |  |  | 45  |
| Зачет   |  |  |  |  |  | 50  |
| Итого за семестр  |  |  |  |  |  | 100 |

#### **4.1 Разделы учебной дисциплины. 2 семестр обучения**

##### **1. Общие сведения из теории электромагнитного поля.**

Диапазон ВЧ и СВЧ. Уравнения Максвелла. Система единиц. Граничные условия. Энергия электромагнитного поля. Теорема единственности. Решение уравнений Максвелла. Скин-эффект и граничные условия. Электродинамическое подобие. Классификация сред на проводники, диэлектрики и полупроводники. Закон Ома. Диэлектрическая проницаемость среды. Поляризованность среды. Виды сред по признаку поляризованности. Потери при поляризации. Зависимость диэлектрической проницаемости и потерь на поляризацию от частоты приложенного поля. Магнитная проницаемость. Виды сред по признаку намагничивания. Потери при намагничивании. Обобщенный закон Ампера в дифференциальной форме в случае монохроматического поля и отсутствия сторонних токов в среде. Критерий классификации сред на проводники, диэлектрики и полупроводники.

##### **2. Принцип суперпозиции и понятие волнового процесса.**

Принцип суперпозиции и линейная однородная среда без сторонних токов в переменном электромагнитном поле. Принцип суперпозиции в случае немонохроматического поля. Отсутствие пространственных зарядов в линейной однородной среде в переменном поле. Волновые уравнения Гельмгольца для векторов  $E$  и  $H$ . Волновой процесс как функция координат и времени. Определение фазового фронта волны и основные виды волн. Понятие однородной волны. Однородная плоская волна в неограниченной однородной линейной среде. Прямая и обратная волны. Фазовая скорость волны. Длина волны. Волновой вектор. Поперечная ТЕМ-волна. Волновое сопротивление среды. Виды поляризации волн.

##### **3. Волны в различных неограниченных средах.**

Волны в диэлектрике. Волны в диэлектрике с малыми потерями на поляризацию и отсутствием магнитных потерь. Волновое число, фазовая скорость волны, длина волны, волновое сопротивление диэлектрика и вакуума. Сложение волн, бегущих навстречу друг другу. Стоячая и бегущая волны. Типичные диэлектрики, используемые на СВЧ. Волны в проводнике. Понятие гиротропной среды. Общая характеристика распространения волны в таких средах. Волны в проводнике при отсутствии магнитных потерь. Скин-слой. Волновое сопротивление проводящей среды. Сопротивление по постоянному току, эквивалентное активной части волнового сопротивления проводящей среды. Протекание токов высокой частоты по проводнику. Скин-эффект; борьба с ним и его использование. Анизотропия. Тензоры диэлектрической и магнитной проницаемостей в анизотропных средах. Естественная и искусственная анизотропия и понятие гиротропности. Невзаимные устройства.

##### **4. Волновые процессы на границах раздела сред.**

Явления на плоской границе раздела двух сред. Явления при нормальном падении. Критерий плоскостности границы раздела сред. Законы отражения и преломления. Следствия формул Френеля. Отражение и преломление на границе раздела идеальных диэлектриков. Угол Брюстера, его применение на СВЧ. Понятие более плотной среды. Полное внутреннее отражение. Поверхностная волна. Понятие диэлектрического волновода. Явления при отсут-

ствии поглощения в средах. Нормальное падение на сильно поглощающую среду. Случаи падения на реальный и идеальный проводники. Явления при наклонном падении на границу диэлектрик-металл. Наклонное падение плоской волны на границу диэлектрик-металл. Направляемая волна. Падение волн различных поляризаций. Простейший волновод из двух металлических пластин. Прямоугольный волновод. Объёмный прямоугольный резонатор. Типы и параметры направляемых волн. Волны типа Н и Е. Критическая длина волны и частота отсечки в прямоугольном волноводе. Докритический и закритический режимы работы волновода. Фазовая скорость и длина волны в прямоугольном волноводе; концепция Бриллюэна, энергетическая скорость волны в волноводе и соотношение между ней и фазовой скоростью. Дисперсия волн. Примеры нормальных и аномальных дисперсных сред и направляющих систем. Понятие поверхностного импеданса и граничное условие Леонтовича. Поглощение энергии в проводнике при отражении волны от него и эквивалентный поверхностный ток в проводнике.

**Таблица 2 – Календарно-тематический план занятий и контроля. 3 семестр обучения**

| Раздел учебной дисциплины  | Недели | Виды учебной деятельности |               |                                  | Текущий контроль успеваемости | Аттестация раздела | Максимальный Балл за раздел |
|--|--------|---------------------------|---------------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|
|  |        | Лекции, час               | Практика, час | Самост. раб./Нед./час            |                               |                    |                             |
| <b>1. Линии передачи СВЧ сигналов.</b>   |        |                           |               |                                  |                               |                    |                             |
| Линии передачи ТЕМ волн. Полые металлические волноводы прямоугольного сечения.   | 1      | 2                         |               |                                  |                               | зачет              |                             |
| <b>Дискуссия по теме:</b> Линии передачи ТЕМ волн. Коаксиальная линия. Волна типа $H_{10}$ в волноводе прямоугольного сечения. | 2      |                           | 2             |                                  | УО, Д                         | зачет              | Д - 5                       |
| Полые металлические волноводы круглого сечения.  | 3      | 2                         |               |                                  |                               | зачет              |                             |
| <b>Дискуссия по теме:</b> Основной тип волны $H_{11}$ в волноводе круглого сечения.  | 4      |                           | 2             |                                  | УО, Д                         | зачет              | Д - 5                       |
| <b>2. Принципы согласования линий передач СВЧ и методы его осуществления.</b>  |        |                           |               |                                  |                               |                    |                             |
| Линия передачи с распределёнными параметрами. Резонансы в линии передачи.  | 5      | 2                         |               |                                  |                               | зачет              |                             |
| <b>Дискуссия по теме:</b> Линия передачи. Характеристическое сопротивление линии. КО и КСВН.                                   | 6      |                           | 2             |                                  | УО, Д                         | зачет              | Д - 5                       |
| Виды и способы согласования на СВЧ.  | 7      | 2                         |               |                                  |                               | зачет              |                             |
| <b>КР-1 по разделам 1, 2</b>   | 8      |                           | 2             |                                  | КР                            |                    | 5                           |
| <b>3. Принципы построения СВЧ трактов и их пассивные устройства.</b>   |        |                           |               |                                  |                               |                    |                             |
| Принципы сочленений СВЧ трактов. Согласованные нагрузки, короткоза-  | 9      | 2                         |               | Работа по написанию реферата /9- |                               | зачет              |                             |



|  |    |    |    |             |       |       |           |
|--|----|----|----|-------------|-------|-------|-----------|
| мыкатели, фазовращатели и аттенюаторы.   |    |    |    | 1бнед/2 час |       |       |           |
| <b>Дискуссия по теме:</b> Согласованные нагрузки, фазовращатели и аттенюаторы.                                 | 10 |    | 2  |             | УО, Д | зачет | Д - 5     |
| Объёмные резонаторы, замедляющие системы.  | 11 | 2  |    |             |       | зачет |           |
| <b>Практическое занятие:</b> обсуждение вопросов и решение задач по разделам 1-2                               | 12 |    | 2  |             | УО    | зачет | 5         |
| Деление СВЧ мощности с помощью тройников, направленных ответвителей и СВЧ мостов. Ферритовые СВЧ устройства    | 13 | 2  |    |             |       | зачет |           |
| <b>Практическое занятие:</b> обсуждение вопросов и решение задач по разделу 3                                  | 14 |    | 2  |             | УО    | зачет | 5         |
| <b>4. Генераторы и усилители СВЧ сигналов</b>  |    |    |    |             |       |       |           |
| Вакуумные СВЧ генераторы и усилители.  | 15 | 2  |    |             |       | зачет |           |
| Защита рефератов по предложенным темам   | 16 |    | 2  |             | Р     | зачет | <b>10</b> |
| Зачет  | 17 |    |    |             |       |       |           |
| Итого  | 17 | 16 | 16 | 4           |       |       |           |
| <b>Бально-рейтинговая система (максимальное количество баллов за семестр)</b>                                  |    |    |    |             |       |       |           |
| Посещаемость   |    |    |    |             |       |       | 5         |
| Кол-во баллов за работу в семестре:<br>1 КР – 5 баллов;<br>4 Д – 20 баллов;<br>Р – 10 баллов<br>УО – 10 баллов |    |    |    |             |       |       | 45        |
| Зачет  |    |    |    |             |       |       | 50        |
| Итого за семестр   |    |    |    |             |       |       | 100       |

#### 4.2 Разделы учебной дисциплины. 3 семестр обучения

##### 1. Линии передачи СВЧ сигналов.

Линии передачи ТЕМ волн. Полые металлические волноводы прямоугольного сечения. Однопроводная линия. Двухпроводная линия. Четырехпроводная линия. Коаксиальная линия. Волновые сопротивления этих линий. Сравнение этих линий передачи и их недостатки при работе на СВЧ. Волны  $H_{mn}$  и  $E_{mn}$ . Критические частоты и длины волн. Картины силовых линий в поперечном и продольном направлениях волновода. Основная волна типа  $H_{10}$  прямоугольного волновода. Критическая длина волны и частота волны  $H_{10}$ . Структура волны  $H_{10}$ , характер ее затухания с изменением частоты. Выбор размеров одномодового прямоугольного волновода. Полые металлические волноводы круглого сечения. Критические частоты  $E$  и  $H$

волн. Основная волна  $H_{11}$  круглого волновода. Условие одномодового режима этой волны и её структура. Явление поляризационного вырождения.

## **2. Принципы согласования линий передач СВЧ и методы его осуществления.**

Линия передачи с распределёнными параметрами. Резонансы в линии передачи. Регулярная линия передачи. Телеграфные уравнения. Характеристическое сопротивление линии без потерь, коэффициент отражения. Входное сопротивление линии, нагруженной на комплексную нагрузку. Ее характер при некоторых частных случаях нагрузки. Линия, нагруженная на характеристическое сопротивление. Режим бегущей волны. Случай произвольной нагрузки, не равной характеристическому сопротивлению. Режим смешанных волн. Трансформирующие свойства четвертьволновой линии, нагруженной на активное сопротивление. Коэффициент стоячей волны по напряжению. Графики напряжения и входного сопротивления в зависимости от длины линии передачи и некоторых частных случаев нагрузок линии. Виды и способы согласования на СВЧ Низкочастотное согласование. Условия согласования на СВЧ и преимущества согласованной СВЧ линии. Узкополосное согласование – согласование четвертьволновым трансформатором, последовательным и параллельным шлейфами. Широкополосное согласование – согласование частотным компенсатором, ступенчатыми и плавными трансформаторами. Примеры согласующих устройств в линиях передачи СВЧ – в волноводных, коаксиальных и микрополосковых.

## **3. Принципы построения СВЧ трактов и их пассивные устройства.**

Принципы сочленений СВЧ трактов. Согласованные нагрузки, короткозамыкатели, фазовращатели и аттенюаторы. Контактные и дроссельно–фланцевые соединения волноводов. Соединение «штырь–гнездо» коаксиальных линий. Ступенчатые и плавные E и H волноводные изгибы. Волноводная скрутка. Коаксиальные изгибы. Изгибы микрополосковых линий. Переходы между различными линиями передачи СВЧ. Согласованные нагрузки – волноводные, коаксиальные и микрополосковые. Короткозамыкающие волноводные и коаксиальные поршни с лепестками и дроссельного типа. Телескопические и тромбонные фазовращатели. Диэлектрические волноводные фазовращатели и поглощающие аттенюаторы. Объёмные резонаторы, замедляющие системы Цилиндрические и прямоугольные резонаторы. Коаксиальный резонатор. Основные параметры и ЭДХ резонаторов – добротность, полоса пропускания, АЧХ, ФЧХ. Примеры ускоряющих резонансных структур. Деление СВЧ мощности с помощью тройников, направленных ответвителей и СВЧ мостов. Ферритовые СВЧ устройства. Волноводные симметричные Y-тройники. Волноводные коаксиальные и микрополосковые T-тройники. Направленные ответвители – волноводный двухдырочный, с перекрывающимися волноводами, микрополосковые. Волноводный шелевой мост, кольцевой мост, двойной T- мост. Фазодвигатели и преобразователи поляризации. Вентили резонансного типа и на эффекте смещения поля. Поляризационный вентиль. СВЧ Yциркуляторы и ферритовые поляризационные циркуляторы и модуляторы.

## **4. Генераторы и усилители СВЧ сигналов**

Вакуумные СВЧ генераторы и усилители. Вакуумный СВЧ триод – пример резонансной системы со статическим управлением электронного потока. Клистроны – СВЧ приборы с динамическим управлением электронного потока. Скоростная модуляция и модуляция электронного потока по плотности. Лампа бегущей волны - пример нерезонансной системы с динамическим управлением электронного потока. Лампа обратной волны. Магнетроны, принципы их действия, конструкции, предельные характеристики.

### **4.3 Планы практических занятий**

Цель практических занятий – закрепить основные (базовые) понятия и определения изучаемой темы посредством подготовки к дискуссиям, практическим занятиям; приобрести начальные навыки решения типовых задач по изучаемой теме посредством выполнения практических работ.

## 2 СЕМЕСТР ОБУЧЕНИЯ

1. Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной форме.  
Практическое занятие проводится в форме дискуссии, максимальная оценка 5 баллов  
Вопросы: Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной форме. Скин-эффект и граничные условия.
2. Классификация сред. Закон Ома. Закон Ампера.  
Практическое занятие проводится в форме дискуссии, максимальная оценка 5 баллов  
Вопросы: Закон Ома. Закон Ампера. Диэлектрическая и магнитная проницаемости среды. Классификация сред.
3. Принцип суперпозиции. Волновые уравнения Гельмгольца для векторов  $E$  и  $H$ .  
Практическое занятие проводится в форме дискуссии, максимальная оценка 5 баллов  
Вопросы: Волновые уравнения Гельмгольца для векторов  $E$  и  $H$ . Волновой процесс как функция координат и времени.
4. Однородная плоская волна. Прямая и обратная волны. Фазовая скорость волны.  
Практическое занятие проводится в форме дискуссии, максимальная оценка 5 баллов  
Вопросы: Прямая и обратная волны. Фазовая скорость волны. Длина волны. Волновой вектор.
5. Волны в диэлектрике. Сложение волн. Стоячая и бегущая волны.  
Практическое занятие проводится в форме дискуссии, максимальная оценка 5 баллов  
Вопросы: Сложение волн, распространяющихся навстречу друг другу. Стоячая и бегущая волны.
6. Волны в проводнике. Анизотропия. Волновое сопротивление проводящей среды.  
Практическое занятие проводится в форме собеседования, решения и разбора типовых задач. Максимальная оценка 5 баллов.  
Вопросы: Скин-слой. Волновое сопротивление проводящей среды.  
Типовые задачи приведены в ФОС.

## 3 СЕМЕСТР ОБУЧЕНИЯ

1. Линии передачи ТЕМ волн. Коаксиальная линия. Волна типа  $H_{10}$  в волноводе прямоугольного сечения.  
Практическое занятие проводится в форме дискуссии, максимальная оценка 5 баллов  
Вопросы: Однопроводная и двухпроводная линии. Коаксиальная линия. Волновые сопротивления этих линий. Волноводы прямоугольного сечения, и его основная волна типа  $H_{10}$ .
2. Основной тип волны  $H_{11}$  в волноводе круглого сечения.  
Практическое занятие проводится в форме дискуссии, максимальная оценка 5 баллов  
Вопросы: Критические частоты  $E$  и  $H$  волн в круглых волноводах. Основной тип волны  $H_{11}$ .
3. Линия передачи. Характеристическое сопротивление линии. КО и КСВН.  
Практическое занятие проводится в форме дискуссии, максимальная оценка 5 баллов  
Вопросы: Линии передач на СВЧ. Телеграфные уравнения. Характеристическое сопротивление линии. Коэффициент отражения и КСВН.

4. Согласованные нагрузки, фазовращатели и аттенюаторы  
 Практическое занятие проводится в форме дискуссии, максимальная оценка 5 баллов  
 Вопросы: Согласованные нагрузки, фазовращатели и аттенюаторы. Согласование ступенчатых волноводных конструкций.

5. Объёмные резонаторы. ЭДХ прямоугольного и цилиндрического резонатора  
 Практическое занятие проводится в форме собеседования, решения и разбора типовых задач. Максимальная оценка 5 баллов.

Вопросы: Прямоугольный, цилиндрический резонаторы. Возможные моды свободных колебаний в резонаторах. Эпюры полей.

Типовые задачи приведены в ФОС.

6. Деление СВЧ мощности. Направленные ответвители.

Практическое занятие проводится в форме собеседования, решения и разбора типовых задач. Максимальная оценка 5 баллов.

Вопросы: Волноводные тройники. Направленные ответвители. Ферритовые СВЧ устройства. Вентили, фазовращатели.

Типовые задачи приведены в ФОС.

#### 4.4 ИНТЕРАКТИВНЫЕ ФОРМЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РЕАЛИЗАЦИИ ДИСЦИПЛИНЫ

##### 2 СЕМЕСТР ОБУЧЕНИЯ

Таблица 3 – Описание в интерактивной форме.

| № недели | Раздел дисциплины (тема)  | Интерактивная форма   | Кол-во часов | Методы и средства контроля   | Максимальный балл |
|----------|---|-----------------------|--------------|--|-------------------|
| 2        | Дискуссия по теме: Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной форме.             | Дискуссия /2нед/2час  | 2            | Педагогическое наблюдение и анализ правильности ответов на вопросы; вопросы, задаваемые по теме; замечания, активности обсуждения и т.п. | 5                 |
| 4        | Дискуссия по теме: Классификация сред. Закон Ома. Закон Ампера.                             | Дискуссия/4нед/2 часа | 2            | Педагогическое наблюдение и анализ правильности ответов на вопросы; вопросы, задаваемые по теме; замечания, активности обсуждения и т.п. | 5                 |
| 6        | Дискуссия по теме: Принцип суперпозиции. Волновые уравнения Гельмгольца для векторов E и H. | Дискуссия/6нед/2 часа | 2            | Педагогическое наблюдение и анализ правильности ответов на вопросы; вопросы, задаваемые по теме; замечания, активности обсуждения и т.п. | 5                 |
| 8        | Дискуссия по теме: Однородная плоская волна. Прямая и обратная волны. Фазо-                 | Дискуссия /8нед/1 час | 2            | Педагогическое наблюдение и анализ правильности ответов на вопросы;  | 5                 |

|             |   |                       |    |  |   |
|-------------|---|-----------------------|----|--|---|
|             | вая скорость волны.   |                       |    | вопросы, задаваемые по теме; замечания, активности обсуждения и т.п.   |   |
| 10          | Дискуссия по теме: Волны в диэлектрике. Сложение волн. Стоячая и бегущая волны. | Дискуссия /10нед/2час | 2  | Педагогическое наблюдение и анализ правильности ответов на вопросы; вопросы, задаваемые по теме; замечания, активности обсуждения и т.п. | 5 |
| ИТОГО часов |   |                       | 10 |  |   |

### 3 СЕМЕСТР ОБУЧЕНИЯ

Таблица 4 – Описание в интерактивной форме.

| № недели    | Раздел дисциплины (тема)  | Интерактивная форма    | Кол-во часов | Методы и средства контроля   | Максимальный балл |
|-------------|---|------------------------|--------------|--|-------------------|
| 2           | Дискуссия по теме: Линии передачи ТЕМ волн. Коаксиальная линия. Волна типа $H_{10}$ в волноводе прямоугольного сечения. | Дискуссия /2нед/4час   | 2            | Педагогическое наблюдение и анализ правильности ответов на вопросы; вопросы, задаваемые по теме; замечания, активности обсуждения и т.п. | 5                 |
| 4           | Дискуссия по теме: Основной тип волны $H_{11}$ в волноводе круглого сечения.  | Дискуссия/4нед/2 часа  | 2            | Педагогическое наблюдение и анализ правильности ответов на вопросы; вопросы, задаваемые по теме; замечания, активности обсуждения и т.п. | 5                 |
| 6           | Дискуссия по теме: Линия передачи. Характеристическое сопротивление линии. КО и КСВН.                                   | Дискуссия/6нед/2 часа  | 2            | Педагогическое наблюдение и анализ правильности ответов на вопросы; вопросы, задаваемые по теме; замечания, активности обсуждения и т.п. | 5                 |
| 10          | Дискуссия по теме: Согласованные нагрузки, фазовращатели и аттенюаторы  | Дискуссия/10нед/2 часа | 2            | Педагогическое наблюдение и анализ правильности ответов на вопросы; вопросы, задаваемые по теме; замечания, активности обсуждения и т.п. | 5                 |
| ИТОГО часов |   |                        | 8            |  |                   |

## 5 Самостоятельная работа студентов

### 2 СЕМЕСТР ОБУЧЕНИЯ

Таблица 5 – Календарно-тематический план самостоятельной работы студентов

| Номер недели | Номер темы | Задание для СРС                    | Форма занятий для контроля | Кол-во часов СРС |
|--------------|------------|------------------------------------|----------------------------|------------------|
| 1            | 1          | Подготовка к дискуссии             | Д                          |                  |
| 3            | 1          | Подготовка к дискуссии             | Д                          |                  |
| 5            | 2          | Подготовка к дискуссии             | Д                          |                  |
| 7            | 2          | Подготовка к дискуссии             | Д                          |                  |
| 9            | 3          | Подготовка к дискуссии             | Д                          |                  |
| 11           | 3          | Подготовка к КР                    | Д                          |                  |
| 13           | 4          | Подготовка к практическому занятию | Д                          |                  |
| 9-16         | 1-4        | Работа по написанию реферата       | защита реферата            |                  |
| ИТОГО:       |            |                                    |                            | 4                |

### 3 СЕМЕСТР ОБУЧЕНИЯ

Таблица 6 – Календарно-тематический план самостоятельной работы студентов

| Номер недели | Номер темы | Задание для СРС              | Форма занятий для контроля | Кол-во часов СРС |
|--------------|------------|------------------------------|----------------------------|------------------|
| 9-16         | 1-4        | Работа по написанию реферата | защита реферата            |                  |
| ИТОГО:       |            |                              |                            | 4                |

## 6 ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ ПО КУРСУ ФИЗИКА И ТЕХНИКА УСКОРИТЕЛЕЙ

Каждый студент в течение семестра должен подготовить 1 реферат. Темы рефератов выдаются на 8 неделе. К 16 неделе студенты усваивают материал курса в полной мере. Защита рефератов проходит на 16 неделе в виде докладов. Все студенты принимают активное участие в обсуждении тем рефератов.

### 2 СЕМЕСТР ОБУЧЕНИЯ

1. Диапазон ВЧ и СВЧ. Природа возникновения и принципы распространения электромагнитных волн данного диапазона частот.
2. Основы теории электромагнетизма. Уравнения Максвелла. Материальные уравнения.
3. Линии СВЧ передачи. Прямоугольные, круглые, коаксиальные и другие типы волноводов, и их основные физические характеристики.
4. Прямоугольный резонатор. Возможные моды колебаний. Выражение для компонент напряженности полей. Собственная добротность и мощность потерь в стенках резонатора.
5. Цилиндрический резонатор. Возможные моды колебаний. Выражение для компонент напряженности полей. Собственная добротность и мощность потерь в стенках резонатора.
6. Коаксиальный резонатор. Возможные моды колебаний. Выражение для компонент напряженности полей. Собственная добротность и мощность потерь в стенках резонатора.

### 3 СЕМЕСТР ОБУЧЕНИЯ

1. Способы возбуждения волноводных и резонаторных структур. Узлы ввода ВЧ и СВЧ мощности, трансформаторы типов волн (ТТВ).

2. Ускоряющие структуры резонансных ускорителей заряженных частиц. Обзор и их основные электродинамические характеристики.
3. Измерения на СВЧ. Особенности, методы проведения измерений, используемые измерительные приборы и элементы СВЧ техники.
4. Магнетроны. Обзор и физические принципы работы данных приборов СВЧ.
5. Клистроны. Обзор и физические принципы работы данных приборов СВЧ.
6. Обзор современных вычислительных методов и доступного программного обеспечения трехмерного электродинамического моделирования.

7. ВОПРОСЫ К КОНТРОЛЬНЫМ РАБОТАМ ПРИВЕДЕНЫ В ФОС

8. БИЛЕТЫ К ЗАЧЕТАМ ПРИВЕДЕНЫ В ФОС

### **9. Образовательные технологии**

В соответствии с требованиями ФГОС ВО по подготовке студентов для направления (специальности) 03.04.01 "Физика фундаментальных взаимодействий" реализация компетентного подхода к обучению предусматривает широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков студентов. В рамках учебного курса студенты работают с лекциями, рекомендованной литературой, выполняют домашние задания. В процессе подготовки студенты используют информационные источники, размещенные в сети Интернет (официальные сайты, веб-порталы и веб-представительства организаций, предприятий и учреждений, тематические форумы и телекоммуникации), электронные учебники и учебно-методические пособия.

### **10. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

#### **ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:**

- 1 А.Д. Григорьев. Электродинамика и техника СВЧ. – М: Изд Высшая школа,
- 2 И.В. Лебедев. Техника и приборы СВЧ. - М: Изд.ВШ. Т.1 - 1970.
- 3 И.В. Лебедев. Техника и приборы СВЧ. - М: Изд.ВШ. Т.2 - 1972.
- 4 В.В. Никольский. Электродинамика и распространение радиоволн. – М: Наука, 1973.
- 5 В.М. Максимов. Линии передачи СВЧ диапазона. - МО РФ, УМО по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации. Выпуск 2, САЙНС - ПРЕСС, 2002.
- 6 В.М. Максимов. Устройства СВЧ: основы теории и элементы тракта. - МО РФ, УМО по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации. Выпуск 3, САЙНС - ПРЕСС, 2002.
- 7 Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. Под ред. Г.А. Ерохина. - М: Изд. Радио и связь, 1996.
- 8 Генераторы и усилители СВЧ. Под ред. И.В. Лебедева. М., Радиотехника, 2006.
- 9 Л.Г. Гассанов, А.А. Липатов, В.В. Марков, Н.А. Могильченко. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи- М: Изд. Радио и связь, 1988.
- 10 М.С. Гусятинер, А.И. Горбачев. Полупроводниковые сверхвысокочастотные диоды. – М: Изд. Радио и связь, 1983.
- 11 Т.Н. Нарытник, В.П. Бабак, М.Е. Ильченко, С.А. Кравчук. Микроволновые технологии в телекоммуникационных системах. – Киев: Изд. Техника, 2000.
- 12 А.Л. Драбкин, В.Л. Зузенко, Ф.Г. Кислов. Антенно-фидерные устройства. – М: Изд. Сов. Радио, 1974.

13 А.А. Харкевич. Основы радиотехники. – М: Изд. Сов. Радио, 1962.

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1 Ю.А. Кацман. Приборы СВЧ. - М: Изд. ВШ. 1983.

2 А.Д. Царапкин. Генераторы СВЧ на диодах Ганна. – М: Изд. Радио и связь, 1982.

3 Радиорелейные и спутниковые системы передачи. Под ред. А.С. Немировского. – М: Изд. Радио и связь, 1986

#### ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА

1 Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Разделы: Ускорители; Приборы и техника эксперимента

2 Журнал технической физики

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

Материально-техническое обеспечение включает в себя специально оборудованные кабинеты и аудитории: компьютерные классы, аудитории, оборудование мультимедийными средствами обучения. Аудитория предоставляется по расписанию. Количество мест – не менее 10. В качестве лучшего восприятия предмета используются экскурсии на действующие резонансные электронные ускорители ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ: ЛУ10-20, ЛУ50, ЛУ8-2, БЕТА-8.

### **12. Методические рекомендации по организации изучения дисциплины**

Изучение дисциплины «Физика и техника сверхвысоких частот» предполагает освоение материалов лекций, систематическую работу студентов в ходе проведения семинарских занятий, тестовых заданий, выполнение заданий для самостоятельной работы. При прослушивании курса должен быть усвоен необходимый объем знаний о процессах возникновения и распространения электромагнитных колебаний диапазона СВЧ. Должны быть получены представления о физических основах работы СВЧ приборов, узлов и элементов передающих СВЧ трактов, и принципах проектирования резонансных ВЧ и СВЧ ускоряющих структур..

На лекциях раскрываются основные вопросы в рамках рассматриваемой темы, ставятся акценты на наиболее сложных положениях изучаемого материала. Материалы лекции используются студентами для подготовки к семинарским занятиям.

Целью семинарского занятия является рассмотрение основных и наиболее проблемных вопросов в рамках темы занятия, контроль за степенью усвоения студентами пройденного материала и ходом выполнения ими заданий самостоятельной работы. В ходе семинарских занятий закрепляются умения и навыки использования прослушанного в ходе лекций и самостоятельных работ материала, его дальнейшее осмысление с целью более глубокой увязки с общефизической картиной мира.

Задания для самостоятельной работы предусмотрены для закрепления и расширения знаний, умений и навыков, приобретенных в результате изучения дисциплины. Задания выполняются студентами в письменном виде во внеаудиторное время.

Работа должна носить творческий характер. При ее оценке учитывается обоснованность и оригинальность выводов. В письменной работе студент должен полно и всесторонне рассмотреть все аспекты задания, четко сформулировать и аргументировать свою позицию по исследуемым вопросам.



РП составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки (специальности) 03.04.01 Прикладные математика и физика специализация "Физика фундаментальных взаимодействий".

## 11 Контрольно-измерительные материалы

### Текущий и итоговый контроль знаний студентов:

- посещаемость занятий;
- участие в дискуссиях, консультирование студентов, проверка выполнения ими самостоятельных, контрольных и тестовых заданий, написание и защита реферата по предложенной теме;
- сдача зачета по билетам.

Оценка знаний по 100-бальной шкале в соответствии с критериями СарФТИ НИЯУ МИФИ реализуется следующим образом:

**Таблица 4 - Критерии оценки знаний студентов**

| Сумма баллов по дисциплине | Оценка (ECTS) | Критерии оценивания   |
|----------------------------|---------------|---|
| 90 – 100                   | A             | «Отлично» - теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов. Необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы. Все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены. Качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному.   |
| 85-89                      | B             | «Очень хорошо» - теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов. Необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы. Все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены. Качество выполнения большинства из них оценено числом баллов, близким к максимальному.                         |
| 75-84                      | C             | «Хорошо» - теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, некоторые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы недостаточно. Все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены. Качество выполнения ни одного из них оценено минимальным числом баллов. Некоторые виды заданий выполнены с ошибками. |
| 65-74                      | D             | «Удовлетворительно» - теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера. Необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий выполнено. Некоторые из выполненных заданий, возможно, содержат ошибки.        |
| 60-64                      | E             | «Посредственно» - теоретическое содержание курса освоено частично. Некоторые практические навыки работы не сформированы. Многие предусмотренные программой обучения учебные задания не выполнены, либо качество выполнения некоторых из них оценено числом баллов, близким к минимальному.  |
| Ниже 60                    | F             | «Неудовлетворительно» - очень слабые знания, недостаточные для понимания курса, имеется большое количество основных ошибок и недочетов.   |



## **Лист регистрации изменений**

