

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики  
Российской академии наук» (ИПФ РАН)

УТВЕРЖДАЮ:



Зам. директора по научной работе

  
М.Ю. Глявин

«15» апреля 2022 г.

## Рабочая программа дисциплины

### Радиофизика

---

Уровень образования

высшее образование – подготовка кадров высшей квалификации

---

Научная специальность

1.3.4. Радиофизика

(шифр, наименование)

---

Форма обучения

очная

---

Нижний Новгород

2022

## **1. Место и цели дисциплины в структуре программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре**

Дисциплина «Радиофизика» относится к числу специальных дисциплин программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре (далее – программы аспирантуры), является обязательной для освоения и изучается на третьем году обучения, в пятом семестре.

Освоение дисциплины опирается на знания, умения и навыки, сформированные на двух предшествующих уровнях образования и на первых двух годах обучения в аспирантуре. В частности, на знания, умения и навыки, полученные в ходе освоения таких дисциплин, как «Теория колебаний и волн», «Электродинамика», «Электромагнитные волны», «Электродинамика квазиоптических систем», «Релятивистская высокочастотная электроника», «Статистическая радиофизика», «Микроволновая спектроскопия», «Современные проблемы физики» и т.п.

Основными целями освоения дисциплины являются формирование у аспирантов углубленных представлений об общих радиофизических закономерностях колебательно-волновых процессов (как линейных, так и нелинейных) в системах различной физической природы и подготовка аспирантов к профессиональной деятельности в таких областях как электродинамика, высокочастотная электроника больших мощностей, нелинейная динамика сложных пространственно-временных процессов и систем.

## **2. Планируемые результаты обучения по дисциплине**

В результате обучения аспиранты должны на углубленном уровне овладеть радиофизическими методами анализа процессов колебательно-волновой природы в различных физических системах; получить представление о современных методах генерации, усиления и трансформации электромагнитного излучения различных частотных диапазонов; ознакомиться с основными подходами для разработки квазиоптических линий передач; получить навыки использования новейших методов статистической радиофизики, включая построение эмпирических прогностических моделей сложных систем. Освоение данной дисциплины необходимо для умения самостоятельно ставить и решать научные задачи в области нелинейной физики и радиофизики с привлечением современного математического аппарата.

Аспирант, освоивший дисциплину «Радиофизика», должен:

Знать основные радиофизические методы и подходы к исследованиям колебательно-волновых процессов (как линейных, так и нелинейных) в системах различной физической природы.

Уметь применять полученные знания для анализа процессов генерации, усиления, передачи и трансформации электромагнитного излучения различных частотных диапазонов, а также нелинейной динамики сложных пространственно-временных процессов и систем.

Владеть современным математическим аппаратом для научных исследований в различных областях физики и радиофизики с учетом отечественного и зарубежного опыта.

По результатам освоения дисциплины «Радиофизика» аспиранты сдают кандидатский экзамен по научной специальности 1.3.4 Радиофизика.

## **3. Структура и содержание дисциплины**

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, всего 114 часов, из которых 34 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (32 часа занятия лекционного типа, 2 часа мероприятия промежуточной аттестации), 36 часов – подготовка к сдаче кандидатского экзамена, 44 часа составляет самостоятельная работа обучающегося.

## Структура дисциплины

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	В том числе			Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Контактная работа, часов			
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Всего	
Вводная лекция по радиофизике	2	2		2	0
Линейные волновые процессы	14	6		6	8
Теория колебаний и нелинейная динамика	12	4		4	8
Статистическая радиофизика	12	4		4	8
Генерация и усиление колебаний и волн	12	4		4	8
Антенны и распространение радиоволн	4	2		2	2
Выделение сигналов на фоне помех	4	2		2	2
Электромагнитное поле движущихся заряженных частиц	4	2		2	2
Излучение электромагнитных волн заряженными частицами	4	2		2	2
Электромагнитные поля в сплошных средах	4	2		2	2
Излучение электромагнитных волн	4	2		2	2
<b>Аттестация по дисциплине – кандидатский экзамен</b>				2	36
<b>Итого</b>		<b>114</b>			

## Содержание дисциплины

**Линейные волновые процессы**

Однородное и неоднородное волновое уравнение. Общие решения однородного волнового уравнения в виде сферических, цилиндрических и плоских волн.

Дисперсионные соотношения для плоских волн в однородных материальных средах. Фазовая и групповая скорости. Поляризация плоских волн.

Электромагнитные волны

Характеристики электромагнитных волн в изотропных средах. Временная и пространственная дисперсия. Соотношения Крамерса-Кронига. Общие закономерности распространения электромагнитных волн в анизотропных средах. Свойства тензора диэлектрической проницаемости кристаллов. Простейшие типы нормальных плоских волн в одно- и трехосном кристаллах, в гиротропной среде. Эффект Фарадея, эффект Коттона-Муттона.

Принцип Гюйгенса-Френеля для скалярных и векторных полей.

Дифракция света на решетках, щелях, отверстиях и экранах.

Поверхностные электрические и магнитные токи, эквивалентные тангенциальным компонентам полей на границе области. Принцип дополнительных экранов Бабинне. Коротковолновые приближения (метод геометрической оптики, кирхгофовское приближение, метод физической оптики). Понятия дифференциального и полного сечения рассеяния тела.

Закрытые и открытые линии передач. Потери в линиях передач электромагнитной энергии. Диагностика модового состава излучения в волноводах и качества квазиоптических волновых пучков; электродинамические методы управления их параметрами.

### Волны в плазме

Диэлектрическая проницаемость холодной, изотропной плазмы. Плазменные колебания, ленгмюровская частота. Дисперсия высокочастотных электромагнитных волн в однородной изотропной плазме. Полное внутреннее отражение и глубина проникновения электромагнитного поля в плазму. Двухжидкостная модель плазмы и ионный звук. Дисперсионное соотношение для плазменных волн с учетом слабой пространственной дисперсии.

Тензор диэлектрической проницаемости холодной магнитоактивной плазмы. Высокочастотные обыкновенная и необыкновенная нормальные волны (на примерах продольного и поперечного распространения), их показатели преломления, поляризация. Точки отражения и резонансы в плазме, области непрозрачности. Квазипродольное и квазипоперечное приближения для высокочастотных волн в магнитоактивной плазме. Свистящие атмосферерики. Линейные уравнения магнитной гидродинамики. Магнитогидродинамические волны Альвена, быстрая и медленная магнитозвуковые волны.

### Волны в жидкостях и газах

Полная замкнутая система уравнений механики для жидкостей и газов: уравнение непрерывности, уравнение Навье-Стокса для баланса импульсов, закон сохранения энергии в дифференциальной и интегральной форме. Линеаризация уравнений механики жидкостей и газов относительно малых возмущений средних параметров среды. Акустические волны в жидкостях и газах. Поверхностные гравитационные волны. Простая волна. Опрокидывание. Ударная волна

Акустические монополи и диполи. Резонансный поршневой излучатель звука. Акустический импеданс излучателя, присоединенная масса и упругость, сопротивление излучения. Излучение волн Маха при движении хорошо обтекаемых тел со сверхзвуковыми скоростями.

Поглощение звуковых волн в вязкой теплопроводной среде. Скорость звука по Ньютону и по Лапласу.

Акусто-гравитационные и внутренние волны в слоистой стратифицированной среде.

### Волны в упругих твердых телах

Закон Гука и уравнения механики упругих тел. Объемные и сдвиговые деформации. Тензор деформаций и тензор напряжений. Два типа нормальных волн в упругом теле. Особенности волн в пьезокристаллах, поверхностные волны.

Основные уравнения линейной сейсродинамики. Сейсмические волны в упругом полупространстве со свободной границей: волны сжатия, сдвиговые волны, волны Рэлея и Лява. Механизмы взрывов в упругом теле. Импульсное излучение сейсмических волн. Сейсмографы и типичная сейсмограмма. Шкала магнитуд Рихтера.

## **Теория колебаний и нелинейная динамика**

Адиабатические инварианты в системах с одной степенью свободы. Геометрический смысл адиабатического инварианта. Колебательные системы с быстро меняющимися параметрами. Усредненная «высокочастотная» сила. Связь с теорией адиабатических инвариантов.

Резонанс в нелинейных системах. Устойчивость состояний равновесия. Явление гистерезиса при медленном изменении амплитуды силы. Обоснование сходимости в методе Ван-дер-Поля. Оценка точности.

Стохастичность в динамических системах. Экспериментальные признаки стохастичности. Точечные отображения для систем с одной степенью свободы. Отображение Фейгенбаума. Удвоение периода. Инвариантная мера. Эргодичность. «Динамическая» диффузия. Системы с  $3/2$  степенями свободы. Глобальная стохастичность. Критерий перекрытия резонансов. Критерий многопоточности. Уравнение Эйнштейна-Фоккера-Планка.

Цепочки связанных осцилляторов. Функция Блоха. Длинноволновое приближение.

Трехволновые взаимодействия. Условия синхронизма волн. Распадные и нераспадные спектры. Соотношения Мэнли-Роу. Распадная неустойчивость. Волны с «отрицательной» энергией. Взрывная неустойчивость.

Ударные волны. Образование разрывов. Оценка длины опрокидывания. Оценка времени опрокидывания. Структура фронта ударной волны в рамках уравнения Бюргерса. Уравнение Кортевега - Де-Вриза. Солитоны.

Основы качественной теории и теории бифуркаций динамических систем на плоскости. Основные бифуркации многомерных динамических систем. Бифуркации состояний равновесия: двукратное равновесие, бифуркация Андронова-Хопфа. Бифуркации периодических движений: двукратный предельный цикл, удвоение периода, рождение инвариантного тора. Нелокальные бифуркации в окрестности гомоклинической траектории. Динамический хаос. Странный аттрактор.

Характеристические показатели Ляпунова. Фрактальные структуры и размерность странных аттракторов. Ляпуновская размерность. Переход к хаосу через последовательность бифуркаций удвоения периода. Универсальность Фейгенбаума.

Аттрактор Лоренца и хаос в жидкости. Вывод модели Лоренца. Бифуркации в системе Лоренца.

Самофокусировка, качественная модель процесса. Поперечная неустойчивость пучков большой мощности. Филаментация. Однородные каналы. Критическая мощность самофокусировки. Метод моментов: оценка длины самофокусировки, оценка критической мощности. Безаберрационное описание процесса самофокусировки.

Интегрируемые уравнения в частных производных. Интегрируемость в сосредоточенных системах. Метод Дарбу. Безотражательные потенциалы. Условия совместности. Уравнение Бюргерса и его «линеаризуемость». Схема Лэкса. Оценка полного числа солитонов по начальным условиям. Метод обратной задачи рассеяния.

## **Статистическая радиофизика.**

### Случайные процессы и сигналы.

Характеристические, моментные и кумулянтные функции случайного процесса (определения). Корреляционная функция и коэффициент корреляции. Плотность вероятностей и характеристическая функция гауссовского процесса, его основные свойства. Статистическое описание совокупности двух случайных процессов, взаимная корреляционная функция.

Спектральная плотность мощности. Соотношение между энергетическим спектром и автокорреляционной функцией стационарного процесса (формула Винера-Хинчина). Ширина спектра случайного процесса, ее связь с временем корреляции. Узкополосный случайный процесс, его представление с помощью квадратурных компонент, амплитуда и фаза процесса.

Тепловые шумы в квазистационарных цепях. Формула Найквиста.

Оптимальное обнаружение сигналов. Отношение правдоподобия. Обнаружение детерминированного сигнала на фоне гауссовских помех. Соотношение сигнал/шум, методы его повышения. Корреляционный приемник, согласованный фильтр, отношение сигнала к шуму на выходе согласованного фильтра.

### Случайные волновые поля.

Статистические характеристики случайных волновых полей (определения). Среднее поле, пространственно-временная корреляционная функция, моменты высших порядков.

Функция когерентности и ее связь с яркостью (интенсивностью) поля излучения. Закон сохранения яркости в свободном пространстве. Закон изменения яркости на границе сред с различными показателями преломления.

Тепловое электромагнитное поле. Флуктуационно-диссипационная теорема. Обобщенный закон Кирхгофа. Спектральная яркость теплового излучения и его радиояркость температура.

### Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах

Борновское приближение теории рассеяния волн на флуктуациях показателя преломления среды. Избирательный механизм рассеяния.

Методы расчета флуктуаций амплитуды и фазы волны в средах с крупномасштабными неоднородностями показателя преломления: приближение геометрической оптики, метод плавных возмущений Рытова. Флуктуации амплитуды и фазы волны в турбулентной атмосфере.

Эффективный показатель преломления случайно-неоднородной среды для статистически среднего поля. Уравнение для функции когерентности волнового пучка и его связь с уравнением переноса излучения в малоугловом приближении.

Обратное рассеяние волнового пучка на мелкомасштабных неоднородностях среды при наличии крупномасштабных неоднородностей. Когерентные явления при рассеянии назад.

### Отражение волн от шероховатых поверхностей

Поверхность с мелкомасштабными неровностями: коэффициент отражения для среднего поля, параметр Рэлея, удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) и ее связь с пространственным спектром неровностей.

Поверхность с крупномасштабными пологими неровностями: представление УЭПР через функцию распределения уклонов поверхности.

Двухмасштабная модель шероховатой поверхности и ее УЭПР.

## **Генерация и усиление колебаний и волн**

### Общие принципы

Термодинамическая неравновесность среды как необходимое условие усиления и генерации колебаний и волн. Обратная связь в генераторе.

Простейшие фундаментальные модели генераторов и усилителей:

- триодный усилитель,
- усиление волны в среде с отрицательной проводимостью,
- усиление сигнала при взаимодействии волн с противоположными знаками энергии,
- автогенератор как усилитель с положительной обратной связью,
- автогенератор как осциллятор с отрицательным трением,
- параметрические генераторы и усилители,
- регенеративный усилитель.

Флуктуация параметров активной среды как основная причина уширения линии генератора и усилителя.

Селекция мод в генераторах и усилителях с распределёнными параметрами. Взаимодействие (конкуренция и кооперация) мод в нелинейном режиме.

### Квантовая электроника

Элементарные процессы взаимодействия вещества с электромагнитным полем: поглощение, спонтанное и индуцированное излучение фотонов. Коэффициенты Эйнштейна. Оптические уравнения Максвелла-Блоха.

Отрицательная проводимость среды с инверсией населенностей уровней. Когерентность индуцированного излучения.

Усиление электромагнитной волны в среде с инверсией. Самосогласованная система уравнений лазера-автогенератора. Порог самовозбуждения и насыщение.

Методы реализации инверсии населенностей. Трехуровневые и четырехуровневые схемы.

Типы лазеров: твердотельные, газовые, эксимерные и химические лазеры, полупроводниковые лазеры, лазеры на органических красителях.

### Микроволновая вакуумная электроника

Индивидуальное (спонтанное) и коллективное (стимулированное) излучения в квазиклассических системах:

- типы спонтанного излучения электронов: черенковское, переходное и тормозное излучения; рассеяние волн на электронах; соответствующие синхронизмы между электронами и электромагнитными волнами;
- стимулированное излучение электронных потоков; два подхода:
  - а) группировка электронов и излучение электронных сгустков при взаимодействии электронного потока с волной,
  - б) взаимодействие электромагнитной волны с одной из собственных волн электронного потока; конвективная и абсолютная неустойчивости.

*Электронные СВЧ усилители; основные схемы:*

- а) усилитель попутной волны,
- б) секционированные усилители клистронного типа,
- в) регенеративные усилители.

Электронные СВЧ генераторы; принципы обратной связи и основные схемы:

- а) усилитель с положительной обратной связью,
- б) генератор обратной (встречной) волны,
- в) предельный случай генератора с высокодобротным резонатором.

Приборы, основанные на стимулированном черенковском и переходном излучениях электронов: магнетрон, ЛБВ и ЛОВ типа “О”, клистрон.

Приборы, основанные на стимулированном тормозном излучении электронов: мазеры на циклонном резонансе и лазеры на свободных электронах.

### Твердотельная электроника

Твердотельный триод - транзистор:

- биполярный,
- полевой,
- гетеротранзистор.

Генератор Ганна (генератор на отрицательной дифференциальной проводимости).

Генераторы, основанные на отрицательной проводимости, связанной с туннелированием:

- туннельный диод,
- резонансно-туннельный диод.
- ЛПД,
- усиление акустических волн дрейфом носителей в полупроводниках ( $V_{dr} > V_{sound}$ ).

### Генераторы акустических колебаний и волн

Электроакустические преобразователи для воздушной, водной и твердой среды. Диффузорные и рупорные громкоговорители.

Автогенераторы звука. Свистки, сирены, голосовой аппарат, музыкальные инструменты.

Параметрические генераторы звука.

### **Антенны и распространение радиоволн**

Вибратор Герца. Ближняя и дальняя зоны. Диаграмма направленности. Коэффициент усиления и коэффициент рассеяния антенны. Антенны для ДВ, СВ и СВЧ диапазонов. Параболическая антенна. Фазированные антенные решетки. Эффективная площадь и шумовая температура приемной антенны.

Геометрическое и дифракционное приближения при анализе распространения радиоволн. Влияние неровностей земной поверхности. Земные и тропосферные радиоволны. Рассеяние и поглощение радиоволн в тропосфере. Эффект "замирания". Тропосферный волновод. Распространение радиоволн в ионосфере. Дисперсия и поглощение радиоволн в ионосферной плазме. Ионосферная рефракция. Ход лучей в подводном звуковом канале и тропосферном радиоволноводе.

### **Выделение сигналов на фоне помех**

Задачи оптимального приема сигнала. Апостериорная плотность вероятности. Функция правдоподобия. Статистическая проверка гипотез. Критерии Байеса, Неймана-Пирсона и Вальда проверки гипотез.

Априорные сведения о сигнале и шуме. Наблюдение и сообщение. Задачи интерполяции, фильтрации и экстраполяции.

Линейная фильтрация Колмогорова-Винера на основе минимизации дисперсии ошибки. Принцип ортогональности ошибки и наблюдения. Реализуемые линейные фильтры и уравнение Винера-Хопфа. Выделение сигнала из шума. Согласованный фильтр.

Линейный фильтр Калмана-Бьюси. Стохастические уравнения для модели сообщения и шума. Дифференциальные уравнения фильтра. Уравнение для апостериорной информации в форме уравнения Риккати. Сравнение фильтрации методом Колмогорова-Винера и Калмана-Бьюси.

Основные задачи нелинейной фильтрации и синтеза систем.

### **Электромагнитное поле движущихся заряженных частиц**

Электромагнитные поля равномерно и неравномерно движущегося точечного заряда в вакууме. Потенциалы Лиенара-Вихерта.

Электромагнитная масса заряда и трудности классической теории электрона. Классический радиус электрона. Реакция излучения.

### **Излучение электромагнитных волн заряженными частицами**

Теория эффекта Вавилова - Черенкова. Интегральная форма решения задачи об ЭМ полях при прямолинейном и равномерном движении точечного электрического заряда в однородной изотропной среде с учетом временной дисперсии. Мощность излучения волн. Черенковское излучение в прозрачной среде с дисперсией. Проблема прохождения заряженных частиц через вещество. Ионизационные и поляризационные потери.

Дипольное приближение в теории тормозного излучения при соударениях заряженных частиц.

Магнитотормозное излучение электромагнитных волн при движении электрона в постоянном магнитном поле. Распределение энергии по спектру (для циклотронного и синхротронного излучения). Диаграммы направленности излучаемой мощности. Полная излучаемая мощность. Поляризация магнитотормозного излучения. Магнитодрейфовое излучение.

Особенности излучения заряженных частиц в среде: нормальный и аномальный эффект Доплера, депрессия циклотронного излучения в необыкновенной волне на первой гармонике, подавление синхротронного излучения в плазме.

### **Электромагнитные поля в сплошных средах**

Уравнения Максвелла-Лоренца, их усреднение по межатомным масштабам. Поля – действующее и среднее макроскопическое. Диэлектрическая и магнитная проницаемости, проводимость среды.

Среды с временной и пространственной дисперсией. Описание электромагнитного поля на языке спектральных Фурье-компонент. Комплексные диэлектрическая и магнитные проницаемости среды. Фазовая и групповая скорости электромагнитных волн в диспергирующей среде. Плотность энергии электромагнитного поля в диспергирующей среде.



## Излучение электромагнитных волн

Лемма Лоренца и теорема взаимности для гармонических полей. Излучение электромагнитных волн антеннами с заданными распределениями гармонических токов. Сопротивление излучения. Поля излучения в дальней зоне. Связь между угловым распределением излучения и пространственным Фурье-спектром плотности тока.

Возбуждение волноводов и резонаторов штыревыми и щелевыми антеннами. Возбуждение волноводов при облучении открытого торца квазиоптическим волновым пучком. Излучение открытого конца волновода. Согласующие рупоры. Рупорно-линзовые антенны.

Зеркальные параболические антенны, их максимально достижимая направленность, требования к точности изготовления поверхности, способы облучения поверхности. Диаграммы направленности на передачу и на прием. Увеличение углового разрешения с использованием интерферометров.

## 4. Образовательные технологии

Основными видами образовательных технологий дисциплины «Радиофизика» являются занятия лекционного типа и самостоятельная работа обучающегося. Аспирантам даются задания по самостоятельной подготовке материалов по тематике занятий, которые впоследствии обсуждаются с научными руководителями. При необходимости организуются групповые и индивидуальные консультации обучающихся с руководителем образовательной программы.

## 5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспирантов.

Используются виды самостоятельной работы аспиранта: в читальном зале библиотеки ИПФ РАН, в компьютерном классе с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе дисциплины и контролируется научным руководителем аспиранта. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, доступные ресурсы в Интернет по тематике курса, а также конспекты и презентации лекций.

## 6. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине. Описание шкал оценивания.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Радиофизика» проводится в форме кандидатского экзамена по научной специальности 1.3.4 Радиофизика с оценкой по следующей шкале: «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично»). Кандидатский экзамен сдается по совокупности всех освоенных за время обучения специальных дисциплин.

### Критерии оценок:

Отлично	Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Аспирант дает полный и развернутый ответ на все заданные теоретические вопросы; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит почти полные, аргументированное решение сформулированной задачи с незначительными недочетами, способен успешно решить дополнительную задачу. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше
Хорошо	В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Аспирант дает полный ответ на все заданные теоретические вопросы билета с небольшими неточностями, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приво-

	<p>дит почти полное решение сформулированной задачи с некоторыми недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей и не всегда полной обоснованностью выводов, демонстрирующих, в целом, знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 90%.</p>
Удовлетворительно	<p>Минимально достаточный уровень подготовки. Аспирант показывает минимальный уровень теоретических знаний, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит неполные, слабо аргументированное решение сформулированной задачи. Изложение решений и полученные ответы не отличаются стройной логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, что говорит о не достаточно полном понимании общефизических и профессиональных дисциплин, умении применять на практике лишь некоторые приобретенные навыки, владении не всеми изученными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%.</p>
Неудовлетворительно	<p>Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Аспирант дает ошибочные ответы, как на заданные теоретические вопросы, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора; приводит решение сформулированной задачи с грубыми недочетами, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки, не владение методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%.</p>

### Вопросы по программе кандидатского экзамена

1. Линейные колебательные системы. Разложение на нормальные колебания.
3. Линейная колебательная система под воздействием внешней силы.
4. Явление параметрического резонанса.
5. Метод Ван-дер-Поля,
6. Усреднение в системах, содержащих быстрые и медленные движения. Метод Крылова—Боголюбова.
7. Усредненная высокочастотная сила, действующая на заряженную частицу.
8. Автоколебательные системы. Взаимная синхронизация колебаний двух генераторов.
9. Распределенные автоколебательные системы. Лазер как пример такой системы. Условия самовозбуждения.
10. Хаотические колебания в динамических системах. Понятие о хаотическом (странном) аттракторе.
11. Плоские однородные волны. Понятие нормальной волны. Дисперсионное уравнение для волн в анизотропных средах.
12. Плотность и поток энергии волнового поля в прозрачной диспергирующей среде.
- 13.. Фазовая и групповая скорости волн в прозрачной диспергирующей среде.
14. Соотношения Крамерса—Кронига и принцип причинности.
15. Приближение геометрической оптики. Уравнения эйконала. Дифференциальное уравнение луча; лучи и поле волны в слоисто-неоднородных средах.
16. Волны в нелинейных средах без дисперсии. Образование разрывов. Ударные волны.
17. Уравнение Кортевега—де-Вриза и нелинейное уравнение Шредингера. Солитоны.
18. Взаимодействия плоских волн в диспергирующих средах. Генерация второй гармоники.
19. Самовоздействие волновых пучков. Самоподдерживающиеся волновые каналы; самофокусировка.
20. Случайные величины и процессы, способы их описания. Стационарный случайный процесс. Статистическое усреднение и усреднение во времени. Эргодичность.
21. Корреляционные и спектральные характеристики стационарных случайных процессов. Теорема Винера—Хинчина. Белый шум и другие примеры спектров и корреляционных функций.
22. Марковские процессы. Уравнение Фоккера—Планка.

23. Флуктуационно-диссипационная теорема.
24. Оптические резонаторы. Резонатор Фабри—Перо. Понятие о добротности резонатора.
25. Свойство волн в волноведущих системах.
26. Механизм взаимодействия волн и частиц при черенковском и циклотронном резонансе; модель нелинейного маятника.
27. Излучение антенн; ближняя и дальняя зоны. Диаграмма направленности. Эффективная площадь антенны.
28. Радиолокационное сечение рассеяния.
29. Понятие о температуре принимаемого излучения и шумовой температуре антенны.
30. Понятие о колмогоровском спектре турбулентности.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учебное пособие / — 5-е изд., стер. — М. : КНОРУС, 2013. — 448 с. ISBN 978-5-406-00746-4. — 5 экз.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. М.: Наука. Т. 3: Квантовая механика — 5 экз.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. М.: Наука. Т. 5: Статистическая физика — 5 экз.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. М.: Наука. Т.7: Электродинамика сплошных сред — 4 экз.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. М.: Наука. Т. 10: Физическая кинетика. — 4 экз.

б) дополнительная литература:

1. А. А. Балакин, Г. М. Фрайман Основы теории колебаний и волн. Динамика сосредоточенных распределенных систем Федер. агентство науч. орг., Федер. исслед. центр «Ин-т приклад. физики РАН». – Нижний Новгород : ФИЦ ИПФ РАН, 2016. – 232 с. – 2 экз.
2. М.И.Рабинович, Д.И. Трубецков Введение в теорию колебаний и волн. – НИЦ «регулярная и хаотическая динамика».2000. – 560 с. – 3 экз.
3. Шиховцев И.В., Якубов В.П. Статистическая радиофизика. Курс лекций / Новосибирский государственный университет. Новосибирск, 2011. 157 с. Электронный ресурс - Методические материалы НГУ: [http://wwwold.inp.nsk.su/students/radio/2014/stat\\_RF\\_v3.pdf](http://wwwold.inp.nsk.su/students/radio/2014/stat_RF_v3.pdf)

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- Специальные помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет";
- Лицензионное программное обеспечение (*Windows, Microsoft Office*);
- Обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются (при необходимости) электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

Автор

\_\_\_\_\_ А.М. Фейгин

**ПРОГРАММА-МИНИМУМ**  
кандидатского экзамена по специальности

**1.3.4 Радиофизика**  
по физико-математическим наукам

**Введение**

В основу настоящей программы положены следующие дисциплины: теория колебаний; теория волн; статистическая радиофизика; принципы усиления, генерации и управления сигналами; антенны и распространение радиоволн; выделение сигналов на фоне помех. Программа разработана экспертным советом по физике Высшей аттестационной комиссии при участии Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова и Московского физико-технического института (государственного университета).

**1. Теория колебаний**

1. Линейные колебательные системы с одной степенью свободы. Силовое и параметрическое воздействие на линейные и слабо нелинейные колебательные системы.
2. Автоколебательная система с одной степенью свободы. Энергетические соотношения в автоколебательных системах. Методы расчета автоколебательных систем.
3. Воздействие гармонического сигнала на автоколебательные системы. Синхронизация. Явления затягивания и гашения колебаний. Применение затягивания для стабилизации частоты.
4. Аналитические и качественные методы теории нелинейных колебаний. Анализ возможных движений и бифуркаций в фазовом пространстве: метод малого параметра, метод Ван-дер-Поля, метод Крылова-Боголюбова. Укороченные уравнения. Усреднение в системах, содержащих быстрые и медленные движения.
5. Колебательные системы с двумя и многими степенями свободы. Нормальные колебания. Вынужденные колебания.
6. Автоколебательные системы с двумя и более степенями свободы. Взаимная синхронизация колебаний двух генераторов.
7. Параметрическое усиление и параметрическая генерация. Параметрические усилители и генераторы. Деление частоты.
8. Устойчивость стационарных режимов автономных и неавтономных колебательных систем. Временные и спектральные методы оценки устойчивости.
9. Собственные и вынужденные колебания линейных распределенных систем. Собственные функции системы (моды). Разложение вынужденных колебаний по системе собственных функций.
10. Распределенные автоколебательные системы. Лазер как пример такой системы. Условия самовозбуждения. Одномодовый и многомодовый режимы генерации.
11. Хаотические колебания в динамических системах. Понятие о хаотическом (странном) аттракторе. Возможные пути потери устойчивости регулярных колебаний и перехода к хаосу.

**2. Теория волн**

1. Плоские однородные и неоднородные волны. Плоские акустические волны в вязкой теплопроводящей среде, упругие продольные и поперечные волны в твердом теле, электромагнитные волны в среде с проводимостью. Поток энергии. Поляризация.
2. Распространение сигнала в диспергирующей среде. Простейшие физические модели диспергирующих сред. Волновой пакет в первом и втором приближении теории дисперсии. Фазовая и групповая скорости. Параболическое уравнение для огибающей. Расплывание и ком-

прессия импульсов. Поле в средах с временной. Дисперсионные соотношения Крамерса-Кронига и принцип причинности.

3. Свойства электромагнитных волн в анизотропных средах. Оптические кристаллы, уравнение Френеля, обыкновенная и необыкновенная волны. Магнитоактивные среды. Тензор диэлектрической проницаемости плазмы в магнитном поле; нормальные волны, их поляризация.

4. Волны в периодических структурах. Механические цепочки, акустические и оптические фононы. Полосы пропускания и непрозрачности. Электрические цепочки, сплошная среда со слабыми периодическими неоднородностями. Связанные волны.

5. Приближение геометрической оптики. Уравнения эйконала. Дифференциальное уравнение луча. Лучи и поле волны в слоисто-неоднородных средах.

6. Электромагнитные волны в металлических волноводах. Диэлектрические волноводы, световоды. Линзовые линии и открытые резонаторы. Гауссовские пучки.

7. Метод Кирхгофа в теории дифракции. Функции Грина. Условия излучения. Дифракция в зоне Френеля и Фраунгофера. Характеристики поля в фокусе линзы.

8. Волны в нелинейных средах без дисперсии. Образование разрывов. Ударные волны. Уравнение Бюргера для диссипативной среды и свойства его решений. Генерация гармоник исходного монохроматического сигнала, эффекты нелинейного поглощения, насыщения и детектирования.

9. Уравнение Кортевега-де Вриза и синус-Гордона. Стационарные волны. Понятие о солитонах. Взаимодействия плоских волн в диспергирующих средах. Генерация второй гармоники. Параметрическое усиление и генерация.

10. Самовоздействие волновых пучков. Самофокусировка света. Приближения нелинейной квазиоптики и нелинейной геометрической оптики. Обращение волнового фронта. Интенсивные акустические пучки; параметрические излучатели звука.

### 3. Статистическая радиофизика

1. Случайные величины и процессы, способы их описания. Стационарный случайный процесс. Статистическое усреднение и усреднение во времени. Эргодичность. Измерение вероятностей и средних значений.

2. Корреляционные и спектральные характеристики стационарных случайных процессов. Теорема Винера-Хинчина. Белый шум и другие примеры спектров и корреляционных функций.

3. Модели случайных процессов: гауссовский процесс, узкополосный стационарный шум, импульсные случайные процессы, дробовой шум.

4. Отклик линейной системы на шумовые воздействия; функция Грина, интеграл Дюамеля. Действие шума на колебательный контур, фильтрация шума. Нелинейные преобразования (умножения частоты и амплитудное детектирование узкополосного шума).

5. Марковские и диффузионные процессы. Уравнение Фоккера-Планка.

6. Броуновское движение. Флуктуационно-диссипационная теорема. Тепловой шум; классический и квантовый варианты формулы Найквиста. Тепловое излучение абсолютно черного тела.

7. Случайные поля. Пространственная и временная когерентность. Дифракция случайных волн. Теорема Ван Циттерта-Цернике. Дифракция регулярной волны на случайном фазовом экране. Тепловое электромагнитное поле. Теорема взаимности.

8. Рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Борновское приближение, метод плавных возмущений. Рассеяние волн на шероховатой поверхности. Понятие об обратной задаче рассеяния.

9. Взаимодействие случайных волн. Генерация второй оптической гармоники, самофокусировка и самомодуляция частично когерентных волн. Преобразование спектров шумовых волн в нелинейных средах без дисперсии.

#### 4. Принципы усиления, генерации и управления сигналами

1. Принцип работы, устройство и параметры лазеров (примеры: гелий-неоновый лазер, лазер на рубине, полупроводниковый лазер).
2. Оптические резонаторы. Резонатор Фабри-Перо, конфокальный и концентрический резонаторы. Неустойчивый резонатор. Продольные и поперечные типы колебаний. Спектр частот и расходимость излучения. Добротность.
3. Режимы работы лазеров: непрерывный режим генерации, режим модуляции добротности резонатора, режим синхронизации мод. Сверхкороткие импульсы. Шумы лазеров, формула Таунса и предельная стабильность частоты. Оптические компрессоры и получение фемтосекундных импульсов.
4. Молекулярный генератор. Квантовые стандарты частоты (времени).
5. Волноводы, длинные линии и резонаторы. Критическая частота и критическая длина волновода.  $TE$ -,  $TH$ ,- и  $TEM$ -волны. Диэлектрические волноводы. Периодические структуры и замедляющие системы. Волновое сопротивление.
6. Усилители СВЧ-диапазона (резонаторный, бегущей волны). Полоса пропускания усилителя бегущей волны.
7. Генерация волн в СВЧ диапазоне. Принцип работы и устройство лампы бегущей и обратной волны, магнетрона и клистрона. Отрицательное дифференциальное сопротивление и генераторы СВЧ на полевых транзисторах, туннельных диодах, диодах Ганна и лавиннопролетных диодах. Эффект Джозефсона.
8. Взаимодействие волн пространственного заряда с акустическим полем, акустоэлектрический эффект. Принципы работы акустоэлектронных устройств (усилители ультразвука, линии задержки, фильтры, конвольверы, запоминающие устройства).
9. Взаимодействия света со звуком. Дифракция Брэгга и Рамана-Ната. Принципы работы устройств акустооптики (модуляторы и дефлекторы света, преобразователи свет-сигнал, акустооптические фильтры), анализаторы спектра и корреляторы.
10. Линейный электрооптический и магнитооптический эффекты и их применение для управления светом.

#### 5. Антенны и распространение радиоволн

1. Вибратор Герца. Ближняя и дальняя зоны. Диаграмма направленности. Коэффициент усиления и коэффициент рассеяния антенны. Антенны для ДВ, СВ и СВЧ диапазонов. Параболическая антенна. Фазированные антенные решетки. Эффективная площадь и шумовая температура приемной антенны.
2. Геометрическое и дифракционное приближения при анализе распространения радиоволн. Влияние неровностей земной поверхности. Земные и тропосферные радиоволны. Рассеяние и поглощение радиоволн в тропосфере. Эффект "замирания". Тропосферный волновод. Распространение радиоволн в ионосфере. Дисперсия и поглощение радиоволн в ионосферной плазме. Ионосферная рефракция. Ход лучей в подводном звуковом канале и тропосферном радиоволноводе.

#### 6. Выделение сигналов на фоне помех

1. Задачи оптимального приема сигнала. Апостериорная плотность вероятности. Функция правдоподобия. Статистическая проверка гипотез. Критерии Байеса, Неймана-Пирсона и Вальда проверки гипотез.
2. Априорные сведения о сигнале и шуме. Наблюдение и сообщение. Задачи интерполяции, фильтрации и экстраполяции.
3. Линейная фильтрация Колмогорова-Винера на основе минимизации дисперсии ошибки. Принцип ортогональности ошибки и наблюдения. Реализуемые линейные фильтры и уравнение Винера-Хопфа. Выделение сигнала из шума. Согласованный фильтр.

4. Линейный фильтр Калмана-Бьюси. Стохастические уравнения для модели сообщения и шума. Дифференциальные уравнения фильтра. Уравнение для апостериорной информации в форме уравнения Риккати. Сравнение фильтрации методом Колмогорова-Винера и Калмана-Бьюси.
5. Основные задачи нелинейной фильтрации и синтеза систем.

### Основная литература

1. Н. В. Карлов, Н.А. Кириченко. Колебания, волны, структуры. – М.: Физматлит, 2001.
2. М. Б. Виноградова, О.В. Руденко, А.П. Сухоруков. Теория волн. – М.: Наука, 1990.
3. М. И. Рабинович, Д.И. Трубецков. Основы теории колебаний и волн. – М.: Наука, 1987.
4. Н. Н. Моисеев. Асимптотические методы нелинейной механики. – М.: Наука, 1981
5. С.А. Ахманов, Ю.Е. Дьяков, А.С. Чиркин. Введение в статистическую радиофизику и оптику, – М.: Наука, 1981.
6. Н. М. Цейтлин. Антенная техника и радиоастрономия. – М.: Радио и связь, 1976.
7. В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1991.
8. А. Ярив, П.Юх. Оптические волны в кристаллах. – М.: Мир, 1987.
9. Г. Кайно. Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. – М.: Мир, 1990.
10. В. В. Никольский, Т.И. Никольская. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1989.

### Дополнительная литература

1. А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин. Теория колебаний. – М.: Наука, 1981.
2. В. В. Мигулин, В. И. Медведев, Е. Р. Мустель, В. Н. Парыгин. Основы теории колебаний. – М.: Наука, 1988.
3. Г. М. Заславский, Р. З. Сагдеев. Введение в нелинейную физику: От маятника до турбулентности и хаоса. – М.: Наука, 1988.
4. Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. – М.: Наука, 1974.
5. С. М. Рытов. Введение в статистическую радиофизику. Часть 1. Случайные процессы. – М.: Наука, 1976.
6. С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский. Введение в статистическую радиофизику. Часть 2. Случайные поля. – М.: Наука, 1978.
7. Дж. Гауер. Оптические системы связи. – М.: Радио и связь, 1989.
8. Л. Д. Бахрах, С. Д. Кременецкий. Синтез излучающих систем. – М.: Радио и связь, 1974.
9. В. И. Балакший, В. Н. Парыгин, Л. Е. Чирков. Физические основы акустооптики. – М.: Радио и связь, 1985.
10. Ф. Качмарек. Введение в физику лазеров. – М.: Мир, 1981.
11. Л. А. Вайнштейн, В. А. Солнцев. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. – М.: Сов. радио, 1973.
12. В. А. Зверев. Радиооптика. – М.: Сов. радио, 1975.
13. М. Букингем. Шумы в электронных приборах и системах. – М.: Мир, 1986.
14. Н. В. Карлов. Лекции по квантовой электронике. – М.: Наука, 1983.
15. Б. Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Радио и связь, 1989.
16. Л. В. Ландау, Е. М. Лифшиц. Статистическая физика. – М.: Наука, 1999, том V, часть 1.
17. Е. Л. Фейнберг. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. – М.: Наука, 1999.

# ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА кандидатского экзамена по специальности

## 1.3.4 Радиофизика

### Раздел 1. Линейные волновые процессы

Однородное и неоднородное волновое уравнение. Общие решения однородного волнового уравнения в виде сферических, цилиндрических и плоских волн.

Дисперсионные соотношения для плоских волн в однородных материальных средах. Фазовая и групповая скорости. Поляризация плоских волн.

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

1. Характеристики электромагнитных волн в изотропных средах. Временная и пространственная дисперсия. Соотношения Крамерса-Кронига. Общие закономерности распространения электромагнитных волн в анизотропных средах. Свойства тензора диэлектрической проницаемости кристаллов. Простейшие типы нормальных плоских волн в одно- и трехосном кристаллах, в гиротропной среде. Эффект Фарадея, эффект Коттона-Муттона.

Принцип Гюйгенса-Френеля для скалярных и векторных полей. Дифракция света на решетках, щелях, отверстиях и экранах.

Поверхностные электрические и магнитные токи, эквивалентные тангенциальным компонентам полей на границе области. Принцип дополнительных экранов Бабинне. Коротковолновые приближения (метод геометрической оптики, кирхгофское приближение, метод физической оптики). Понятия дифференциального и полного сечения рассеяния тела.

Закрытые и открытые линии передач. Потери в линиях передач электромагнитной энергии. Диагностика модового состава излучения в волноводах и качества квазиоптических волновых пучков; электродинамические методы управления их параметрами.

### ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕ

1. Диэлектрическая проницаемость холодной, изотропной плазмы. Плазменные колебания, ленгмюровская частота. Дисперсия высокочастотных электромагнитных волн в однородной изотропной плазме. Полное внутреннее отражение и глубина проникновения электромагнитного поля в плазму. Двухжидкостная модель плазмы и ионный звук. Дисперсионное соотношение для плазменных волн с учетом слабой пространственной дисперсии.

2. Тензор диэлектрической проницаемости холодной магнитоактивной плазмы. Высокочастотные обыкновенная и необыкновенная нормальные волны (на примерах продольного и поперечного распространения), их показатели преломления, поляризация. Точки отражения и резонансы в плазме, области непрозрачности. Квазипродольное и квазипоперечное приближения для высокочастотных волн в магнитоактивной плазме. Свистящие атмосферерики. Линейные уравнения магнитной гидродинамики. Магнитогидродинамические волны Альвена, быстрая и медленная магнитозвуковые волны.

### ВОЛНЫ В ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ

1. Полная замкнутая система уравнений механики для жидкостей и газов: уравнение непрерывности, уравнение Навье-Стокса для баланса импульсов, закон сохранения энергии в дифференциальной и интегральной форме. Линеаризация уравнений механики жидкостей и газов относительно малых возмущений средних параметров среды. Акустические волны в жидкостях и газах. Поверхностные гравитационные волны. Простая волна. Опрокидывание. Ударная волна

2. Акустические монополи и диполи. Резонансный поршневой излучатель звука. Акустический импеданс излучателя, присоединенная масса и упругость, сопротивление излучения. Излучение волн Маха при движении хорошо обтекаемых тел со сверхзвуковыми скоростями.



Поглощение звуковых волн в вязкой теплопроводной среде. Скорость звука по Ньютону и по Лапласу.

Акусто-гравитационные и внутренние волны в слоистостратифицированной среде.

### ВОЛНЫ В УПРУГИХ ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ.

1. Закон Гука и уравнения механики упругих тел. Объемные и сдвиговые деформации. Тензор деформаций и тензор напряжений. Два типа нормальных волн в упругом теле. Особенности волн в пьезокристаллах, поверхностные волны.

2. Основные уравнения линейной сейсродинамики. Сейсмические волны в упругом полупространстве со свободной границей: волны сжатия, сдвиговые волны, волны Рэлея и Лява. Механизмы взрывов в упругом теле. Импульсное излучение сейсмических волн. Сейсмографы и типичная сейсмограмма. Шкала магнитуд Рихтера.

#### Литература к разделу 1.

1. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. - М.: Наука, 1979, 1-е издание; М.: Наука, 1990, 2-е издание.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. - М.: Наука, 1986.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. - М.: Наука, 1987.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.
5. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. - М.: Советское радио, 1988.
6. Гинзбург В.Л. Электромагнитные волны в плазме. - М.: Наука, 1967.
7. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. - М.: Наука, 1973.
8. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионо-сфере и космической плазме. - М.: Наука, 1984.
9. Железняков В.В. Электромагнитные волны в космической плазме. М.: Наука, 1977.
10. Лайтхилл Д. Волны в жидкостях. - М.: Мир, 1981.
11. Кролл Н., Трайвелпис . Основы физики плазмы. - М.: Мир, 1975.
12. Гинзбург В.Л. Теоретическая физика и астрофизика. - М.: Наука, 1975.

### **Раздел 2. Теория колебаний и нелинейная динамика**

1. Адиабатические инварианты в системах с одной степенью свободы. Геометрический смысл адиабатического инварианта. Колебательные системы с быстро меняющимися параметрами. Усредненная «высокочастотная» сила. Связь с теорией адиабатических инвариантов.

2. Резонанс в нелинейных системах. Устойчивость состояний равновесия. Явление гистерезиса при медленном изменении амплитуды силы. Обоснование сходимости в методе Ван-дер-Поля. Оценка точности.

3. Стохастичность в динамических системах. Экспериментальные признаки стохастичности. Точечные отображения для систем с одной степенью свободы. Отображение Фейгенбаума. Удвоение периода. Инвариантная мера. Эргодичность. «Динамическая» диффузия. Системы с  $3/2$  степенями свободы. Глобальная стохастичность. Критерий перекрытия резонансов. Критерий многопоточности. Уравнение Эйнштейна-Фоккера-Планка.

4. Цепочки связанных осцилляторов. Функция Блоха. Длинноволновое приближение.

5. Трехволновые взаимодействия. Условия синхронизма волн. Распадные и нераспадные спектры. Соотношения Мэнли-Роу. Распадная неустойчивость. Волны с «отрицательной» энергией. Взрывная неустойчивость.

6. Ударные волны. Образование разрывов. Оценка длины опрокидывания. Оценка времени опрокидывания. Структура фронта ударной волны в рамках уравнения Бюргерса. Уравнение Кортевега - Де-Вриза. Солитоны.

7. Основы качественной теории и теории бифуркаций динамических систем на плоскости. Основные бифуркации многомерных динамических систем. Бифуркации состоя-

ний равновесия: двукратное равновесие, бифуркация Андронова-Хопфа. Бифуркации периодических движений: двукратный предельный цикл, удвоение периода, рождение инвариантного тора. Нелокальные бифуркации в окрестности гомоклинической траектории. Динамический хаос. Странный аттрактор.

8. Характеристические показатели Ляпунова. Фрактальные структуры и размерность странных аттракторов. Ляпуновская размерность. Переход к хаосу через последовательность бифуркаций удвоения периода. Универсальность Фейгенбаума.

9. Аттрактор Лоренца и хаос в жидкости. Вывод модели Лоренца. Бифуркации в системе Лоренца.

10. Самофокусировка, качественная модель процесса. Поперечная неустойчивость пучков большой мощности. Филаментация. Однородные каналы. Критическая мощность самофокусировки. Метод моментов: оценка длины самофокусировки, оценка критической мощности. Безабберационное описание процесса самофокусировки.

11. Интегрируемые уравнения в частных производных. Интегрируемость в сосредоточенных системах. Метод Дарбу. Безотражательные потенциалы. Условия совместности. Уравнение Бюргерса и его «линеаризуемость». Схема Лэкса. Оценка полного числа солитонов по начальным условиям. Метод обратной задачи рассеяния.

#### Литература к разделу 2.

1. А.А.Андронов, А.А.Витт, С.Э.Хайкин. Теория колебаний, - М.: Физматгаз, 1959, (М.: Наука, 1981).

2. М.И.Рабинович, Д.И.Трубецков. Введение в теорию колебаний и волн. - М.: Наука, 1984 (1 изд.), 1992 (2 изд.).

3. Г.М.Заславский, Р.З.Сагдеев. Введение в нелинейную физику. - М.: Мир, 198

4. Н.В.Бутенин, Ю.И.Неймарк, Н.А.Фуфаев. Введение в теорию нелинейных колебаний. - М.: Наука, 1987.

5. Н.Н.Боголюбов, Ю.И.Митропольский. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. - М.: Наука, 1974.

6. С.П.Стрелков. Введение в теорию колебаний. - М.: Наука, 1964.

7. Л.И.Мандельштам. Лекции по теории колебаний, - М.: Наука, 1972.

8. М.И.Рабинович. Теория колебаний и волн. Учебное пособие. - Горький, Изд-во ГГУ, 1977.

9. М.И.Рабинович, М.И.Мотова, Т.М.Гарантович. Колебания и волны в нелинейных системах. Учебное пособие. - Горький, Изд-во ГГУ, 1978.

10. Сборник задач по теории колебаний. Под ред. В.И.Королева, Л.В.Постникова, - М.: Наука, 1978.

11. В.С.Анищенко. Сложные колебания в простых системах. - М.: Наука, 1990.

12. Г.Шустер. Детерминированный хаос. - М.: Мир, 1988.

13. М.Абловиц, Х.Сигур. Солитоны и метод обратной задачи рассеяния.

14. С.Н.Власов, В.Н.Таланов. Самофокусировка волн. РАН-ИПФ, Н.Новгород. 1998.

### **Раздел 3. Статистическая радиофизика.**

#### **1. Случайные процессы и сигналы.**

1.1. Характеристические, моментные и кумулянтные функции случайного процесса (определения). Корреляционная функция и коэффициент корреляции. Плотность вероятностей и характеристическая функция гауссовского процесса, его основные свойства. Статистическое описание совокупности двух случайных процессов, взаимная корреляционная функция.

1.2. Спектральная плотность мощности. Соотношение между энергетическим спектром и автокорреляционной функцией стационарного процесса (формула Винера).

- ра-Хинчина). Ширина спектра случайного процесса, ее связь с временем корреляции. Узкополосный случайный процесс, его представление с помощью квадратурных компонент, амплитуда и фаза процесса.
- 1.3. Тепловые шумы в квазистационарных цепях. Формула Найквиста.
  - 1.4. Оптимальное обнаружение сигналов. Отношение правдоподобия. Обнаружение детерминированного сигнала на фоне гауссовских помех. Соотношение сигнал/шум, методы его повышения Корреляционный приемник, согласованный фильтр, отношение сигнала к шуму на выходе согласованного фильтра.
2. Случайные волновые поля.
    - 2.1. Статистические характеристики случайных волновых полей (определения). Среднее поле, пространственно-временная корреляционная функция, моменты высших порядков.
    - 2.2. Функция когерентности и ее связь с яркостью (интенсивностью) поля излучения. Закон сохранения яркости в свободном пространстве. Закон изменения яркости на границе сред с различными показателями преломления.
    - 2.3. Тепловое электромагнитное поле. Флуктуационно-диссипационная теорема. Обобщенный закон Кирхгофа. Спектральная яркость теплового излучения и его радиояркость температура.
  3. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах.
    - 3.1. Борновское приближение теории рассеяния волн на флуктуациях показателя преломления среды. Избирательный механизм рассеяния.
    - 3.2. Методы расчета флуктуаций амплитуды и фазы волны в средах с крупномасштабными неоднородностями показателя преломления: приближение геометрической оптики, метод плавных возмущений Рытова. Флуктуации амплитуды и фазы волны в турбулентной атмосфере.
    - 3.3. Эффективный показатель преломления случайно-неоднородной среды для статистически среднего поля. Уравнение для функции когерентности волнового пучка и его связь с уравнением переноса излучения в малоугловом приближении.
    - 3.4. Обратное рассеяние волнового пучка на мелкомасштабных неоднородностях среды при наличии крупномасштабных неоднородностей. Когерентные явления при рассеянии назад.
  4. Отражение волн от шероховатых поверхностей.
    - 4.1. Поверхность с мелкомасштабными неровностями: коэффициент отражения для среднего поля, параметр Рэлея, удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) и ее связь с пространственным спектром неровностей.
    - 4.2. Поверхность с крупномасштабными пологими неровностями: представление УЭПР через функцию распределения уклонов поверхности.
    - 4.3. Двухмасштабная модель шероховатой поверхности и ее УЭПР.

#### Литература к разделу 3.

1. Б.Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники. - М.: Радио и связь, 1989.
2. С.М.Рытов, Ю.А.Кравцов, В.И.Татарский. Введение в статистическую радиофизику, ч.2 - Случайные поля. - М.: Наука, 1978.
3. А.Исмару. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. - М.: Мир, 1981.
5. Л.А.Чернов. Распространение волн в среде со случайными неоднородностями. - М.: Наука, 1975.
6. С.М.Рытов. Теория электрических флуктуаций и теплового излучения. - М.: Изд. АН СССР, 1953.
5. Л.А.Апресян, Ю.А.Кравцов. Теория переноса излучения. - М.: Наука, 1983.

7. В.И.Кляцкин. Статистическое описание динамических систем с флуктуирующими параметрами. - М.: Наука, 1975.
8. В.И.Кляцкин. Стохастические уравнения и волны в случайно-неоднородных средах. - М.: Наука, 1980.
9. Ф.Г.Басс, И.М.Фукс. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. - М.: Наука, 1972.
10. Рабинович М.И Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. - М.: Наука, 1984.

#### **Раздел 4. Генерация и усиление колебаний и волн**

##### **Общие принципы**

Термодинамическая неравновесность среды как необходимое условие усиления и генерации колебаний и волн. Обратная связь в генераторе.

Простейшие фундаментальные модели генераторов и усилителей:

- триодный усилитель,
- усиление волны в среде с отрицательной проводимостью,
- усиление сигнала при взаимодействии волн с противоположными знаками энергии,
- автогенератор как усилитель с положительной обратной связью,
- автогенератор как осциллятор с отрицательным трением,
- параметрические генераторы и усилители,
- регенеративный усилитель.

Флуктуация параметров активной среды как основная причина уширения линии генератора и усилителя.

Селекция мод в генераторах и усилителях с распределёнными параметрами. Взаимодействие (конкуренция и кооперация) мод в нелинейном режиме.

##### **Квантовая электроника**

Элементарные процессы взаимодействия вещества с электромагнитным полем: поглощение, спонтанное и индуцированное излучение фотонов. Коэффициенты Эйнштейна. Оптические уравнения Максвелла-Блоха.

Отрицательная проводимость среды с инверсией населенностей уровней. Когерентность индуцированного излучения.

Усиление электромагнитной волны в среде с инверсией. Самосогласованная система уравнений лазера-автогенератора. Порог самовозбуждения и насыщение.

Методы реализации инверсии населенностей. Трехуровневые и четырехуровневые схемы.

Типы лазеров: твердотельные, газовые, эксимерные и химические лазеры, полупроводниковые лазеры, лазеры на органических красителях.

##### **Микроволновая вакуумная электроника**

1. Индивидуальное (спонтанное) и коллективное (стимулированное) излучения в квазиклассических системах:

- \* типы спонтанного излучения электронов: черенковское, переходное и тормозное излучения; рассеяние волн на электронах; соответствующие синхронизмы между электронами и электромагнитными волнами;
- \* стимулированное излучение электронных потоков; два подхода:

а) группировка электронов и излучение электронных сгустков при взаимодействии электронного потока с волной,

б) взаимодействие электромагнитной волны с одной из собственных волн электронного потока; конвективная и абсолютная неустойчивости.

2. Электронные СВЧ усилители; основные схемы:
  - а) усилитель попутной волны,
  - б) секционированные усилители клистронного типа,
  - в) регенеративные усилители.
3. Электронные СВЧ генераторы; принципы обратной связи и основные схемы:
  - а) усилитель с положительной обратной связью,
  - б) генератор обратной (встречной) волны,
  - в) предельный случай генератора с высокочастотным резонатором.
4. Приборы, основанные на стимулированном черенковском и переходном излучениях электронов: магнетрон, ЛБВ и ЛОВ типа "О", клистрон.
5. Приборы, основанные на стимулированном тормозном излучении электронов: мазеры на циклонном резонансе и лазеры на свободных электронах.

### **Твердотельная электроника**

1. Твердотельный триод - транзистор:
  - биполярный,
  - полевой,
  - гетеротранзистор.
2. Генератор Ганна (генератор на отрицательной дифференциальной проводимости).
3. Генераторы, основанные на отрицательной проводимости, связанной с туннелированием:
  - туннельный диод,
  - резонансно-туннельный диод.
  - ЛПД,
  - усиление акустических волн дрейфом носителей в полупроводниках ( $V_{dr} > V_{sound}$ ).

### **Генераторы акустических колебаний и волн**

Электроакустические преобразователи для воздушной, водной и твердой среды. Диффузорные и рупорные громкоговорители.

Автогенераторы звука. Свистки, сирены, голосовой аппарат, музыкальные инструменты.

Параметрические генераторы звука.

#### Литература к разделу 4.

1. Ярив А. Квантовая электроника. М.: Советское радио, изд.2-е, 1980.
2. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, 1983.
3. Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Советское радио, 1973.
4. Шевчик В.Н., Трубецков Д.И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. М.: Советское радио, 1970.
5. Релятивистская высокочастотная электроника: Сб. статей под ред. Гапонова-Грехова А.В., Горький: ИПФ АН СССР, 1979.
6. Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К. Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике. Изв. ВУЗов, Радиофизика, т.10, с.1414 (1967).
7. Генераторы когерентного излучения на свободных электронах: Сб. статей. Пер. с англ. под ред. А.А.Рухадзе. М.: Мир, 1983.
8. Конуэлл Э. Кинетические свойства полупроводников в сильных полях. М.: Мир, 1970.
9. Шур М. Современные приборы на арсениде галлия. М.: Мир, 1991.
10. Пожела В.К. Плазма и токовые неустойчивости в полупроводниках. М.: Наука, 1977.
11. Вахитов Я.Ш. Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура. М.: Искусство, 1982.

12. Римский-Корсаков А.В., Ямщиков В.С., Жулин В.И., Рехтман В.И. Акустические подводные низкочастотные излучатели Библиотека инженера-гидроакустика). Л.: Судостроение, 1984.
13. Свердлин Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны. Л.: Судостроение, 1980.

## Раздел 5. Дополнительные главы

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ДВИЖУЩИХСЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ.

1. Электромагнитные поля равномерно и неравномерно движущегося точечного заряда в вакууме. Потенциалы Лиенара-Вихерта.
2. Электромагнитная масса заряда и трудности классической теории электрона. Классический радиус электрона. Реакция излучения.

### ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ

1. Теория эффекта Вавилова - Черенкова. Интегральная форма решения задачи об ЭМ полях при прямолинейном и равномерном движении точечного электрического заряда в однородной изотропной среде с учетом временной дисперсии. Мощность излучения волн. Черенковское излучение в прозрачной среде с дисперсией. Проблема прохождения заряженных частиц через вещество. Ионизационные и поляризационные потери.
2. Дипольное приближение в теории тормозного излучения при соударениях заряженных частиц.
3. Магнитотормозное излучение электромагнитных волн при движении электрона в постоянном магнитном поле. Распределение энергии по спектру (для циклотронного и синхротронного излучения). Диаграммы направленности излучаемой мощности. Полная излучаемая мощность. Поляризация магнитотормозного излучения. Магнитодрейфовое излучение.
4. Особенности излучения заряженных частиц в среде: нормальный и аномальный эффект Доплера, депрессия циклотронного излучения в необыкновенной волне на первой гармонике, подавление синхротронного излучения в плазме.

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В СПЛОШНЫХ СРЕДАХ

1. Уравнения Максвелла-Лоренца, их усреднение по межатомным масштабам. Поля – действующее и среднее макроскопическое. Диэлектрическая и магнитная проницаемости, проводимость среды.
2. Среды с временной и пространственной дисперсией. Описание электромагнитного поля на языке спектральных Фурье-компонент. Комплексные диэлектрическая и магнитные проницаемости среды. Фазовая и групповая скорости электромагнитных волн в диспергирующей среде. Плотность энергии электромагнитного поля в диспергирующей среде.

### ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

1. Лемма Лоренца и теорема взаимности для гармонических полей. Излучение электромагнитных волн антеннами с заданными распределениями гармонических токов. Сопротивление излучения. Поля излучения в дальней зоне. Связь между угловым распределением излучения и пространственным Фурье-спектром плотности тока.
2. Возбуждение волноводов и резонаторов штыревыми и щелевыми антеннами. Возбуждение волноводов при облучении открытого торца квазиоптическим волновым пучком. Излучение открытого конца волновода. Согласующие рупоры. Рупорно-линзовые антенны.
3. Зеркальные параболические антенны, их максимально достижимая направленность, требования к точности изготовления поверхности, способы облучения поверхности. Диаграммы направленности на передачу и на прием. Увеличение углового разрешения с использованием интерферометров.

Литература к разделу 5.

1. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теория поля. М.: Наука, 1988.
2. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. М., Наука, 1982.
3. Дж. Джексон. Классическая электродинамика. М., Мир, 1965.
4. В.Л.Гинзбург. Распространение электромагнитных волн в плазме. М., Наука, 1967.
5. В.Л.Гинзбург. Теоретическая физика и астрофизика. М. Наука, 1975
6. В.В.Железняков. Электромагнитные волны в космической плазме. М., Наука, 1977.
4. Л.А.Вайнштейн. Электромагнитные волны. М., Сов. Радио, 1988.
7. А.Г.Кисляков, В.А.Разин, Н.М.Цейтлин. Введение в радиоастрономию. М., Физико-математическая литература, 1995.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

**ПРОТОКОЛ**

заседания экзаменационной комиссии от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Структурное подразделение: \_\_\_\_\_

СОСТАВ КОМИССИИ:                      Председатель: \_\_\_\_\_

утвержден приказом                      Зам.председателя: \_\_\_\_\_

№ \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ г.                      Члены комиссии: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

СЛУШАЛИ:

Прием кандидатского экзамена по специальной дисциплине.

Научная специальность \_\_\_\_\_

*шифр, наименование научной специальности*

от \_\_\_\_\_

*(фамилия, имя, отчество)*

На экзамене были заданы следующие вопросы:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

ПОСТАНОВИЛИ: считать, что \_\_\_\_\_

выдержал экзамен с оценкой \_\_\_\_\_

Председатель экзаменационной комиссии: \_\_\_\_\_

Заместитель председателя: \_\_\_\_\_

Члены экзаменационной комиссии: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_