



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

2.1.ДВ.1.1. ТЕОРИЯ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН

Шифр и наименование группы научных специальностей

1.3. Физические науки

Шифр и наименование научной специальности

1.3.4. Радиофизика

Форма обучения: очная

Институт: математики, естествознания и техники

Кафедра: физики, радиотехники и электроники

Трудоёмкость в ЗЕТ - 3

Трудоёмкость в часах – 108

Разработчик: к.ф.-м.н., доц. Зайцев А.А.

Общие положения

Рабочая программа дисциплины «Теория колебаний и волн» разработана в соответствии с федеральными государственными требованиями, утвержденными приказом Министерства образования и науки высшего образования Российской Федерации от 20 октября 2021 г. № 951.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель дисциплины:

подготовить аспирантов к научно-исследовательской деятельности по специальности радиофизика, к защите научно-квалификационной работы (диссертации) и преподаванию в учреждениях высшего образования.

Задачи изучения дисциплины:

- систематизировать знания по теории колебаний и волн;
- на основании теоретической и практической подготовки аспирантов сформировать навыки к самостоятельной научной и педагогической деятельности.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАНТУРЫ

Дисциплина относится к образовательному компоненту программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, включена в раздел «Элективные дисциплины (модули)».

3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

По окончании изучения дисциплины аспиранты должны:

знать:

- фундаментальные основы теории колебаний и волн;
- современное состояние и перспективы развития исследований в области колебаний и волн;
- основные научные проблемы в области колебаний и волн;

уметь:

- анализировать и обобщать полученную в ходе исследования информацию из моделей для колебательных и волновых систем;
- использовать компьютерные технологии и обрабатывать результаты натурных измерений, проводить их специальный анализ;
- формулировать логичные и обоснованные выводы из анализа собственных научных результатов и опубликованных материалов;

владеть:

- современными методами и технологиями в области колебаний и волн;
- основными современными методами расчета объекта научного

исследования, использующими передовые информационные технологии;
 - навыками корректной постановки научного исследования.

4. СТРУКТУРА, ОБЪЕМ И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Объем дисциплины и виды учебной работы

Трудоёмкость в ЗЕТ - 3

Трудоёмкость в часах – 108

4.2. Разделы дисциплины и виды занятий

№	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоёмкость, академ. часы			
		аудиторные занятия			
		Всего часов	Лекции	практические (лабораторные)	
1	Раздел 1. Основные понятия теории колебаний	36	6	6	24
2	Тема 1. Классификация колебательных систем и процессов	12	2	2	8
3	Тема 2. Свободные и вынужденные колебания	12	2	2	8
4	Тема 3. Вычисление собственных частот для систем с большим числом степеней свободы	12	2	2	8
5	Раздел 2. Нелинейные динамические системы	36	6	6	24
6	Тема 1. Динамические системы	12	2	2	8
7	Тема 2. Основы теории устойчивости	12	2	2	8
8	Тема 3. Бифуркационный анализ	12	2	2	8
9	Раздел 3. Волны	36	6	6	24
10	Тема 1. Основные характеристики волн	12	2	2	8
11	Тема 2. Волны в периодических системах	12	2	2	8
12	Тема 3. Нелинейные волновые процессы	12	2	2	8
	Промежуточная аттестация				

ИТОГО:	108	18	18	72
---------------	-----	----	----	----

5. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

5.1. Текущий контроль по дисциплине осуществляется в форме контрольной работы

Типовой вариант к/р

Задача 1.

Построить качественно фазовые портреты для консервативного осциллятора Дуффинга:

$$\ddot{x} + \alpha x + \beta x^3 = 0$$

в случаях а) $\alpha > 0, \beta > 0$, б) $\alpha > 0, \beta < 0$, в) $\alpha < 0, \beta > 0$.

Задача 2.

Найти поправку к частоте колебаний в нелинейном осцилляторе

$$\ddot{x} + \omega^2 x + \gamma x^5 = 0$$

методом медленно меняющихся амплитуд.

Задача 3.

В осцилляторе Ван дер Поля

$$\ddot{x} - (\varepsilon - x^2)\dot{x} + x = 0$$

исследуйте устойчивость состояний равновесия в зависимости от параметра ε .

Задача 4.

Найти дисперсионное уравнение для цепочки связанных маятников массы m , длины l , расположенных на расстоянии a друг от друга и связанных пружинами с жесткостью k .

Задача 5.

Найти дисперсионное уравнение для цепочки, составленной из последовательно соединенных индуктивностей L и параллельно соединенных емкостей C (фильтр нижних частот).

5.2. Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в 1 семестре в форме зачета

Перечень вопросов к зачету

1. Предмет физики колебаний и волн. Критика теории колебаний Хартманом и др. Особенности физики колебаний и волн. Общность колебаний в различных разделах физики. Примеры колебательных и волновых процессов.

2. Физический маятник. Обратная задача в физических исследованиях. Эмпирическое описание кинематики колебаний маятника. Параметрическая и непараметрическая аппроксимация экспериментальных данных. Анализ движения на основе метода теории размерности. Построение модельных уравнений движения на основе результатов аппроксимации.

3. Гармоническая аппроксимация движения физического маятника. Уравнение гармонического осциллятора: размерная и безразмерная формы. Подобие движение гармонических осцилляторов. Амплитуда, частота, период и фаза колебательного движения. Операторная форма уравнения гармонического осциллятора, его факторизация. Решение в виде мнимых

экспонент. Соотношения Эйлера. Векторные диаграммы, ортогональность синуса и косинуса.

4. Скалярное произведение функций. Гармонический осциллятор и задача на собственные значения. Ортогональная система функций. Ряд Фурье. Интеграл Фурье. Ядро преобразования Фурье, как собственная функция задачи на собственное значение. Пример разложений в ряд и интеграл Фурье. Соотношение неопределенности. Общие черты и различие ряда и интеграла Фурье. Биения. Интеграл Фурье и принцип причинности.

5. Особая роль линейного приближения. Метод размерности. Слабая нелинейность. Уравнение Дюффинга. Метод Пуанкаре определения частоты колебаний нелинейного осциллятора. Характер приближения.

6. Общий случай нелинейных колебаний. Метод фазовой плоскости. Основные определения: Динамическая система, фазовое пространство, фазовая скорость, фазовая точка, фазовый портрет. Преимущества метода фазовой плоскости. Особые точки: центр, седло. Классификация траекторий. Фазовый портрет физического маятника. Связь особых точек фазовой плоскости с потенциальной энергией консервативной системы.

7. Перевернутый физический маятник. «Мягкая» мода. Спонтанное нарушение симметрии (Буриданов осел). Фазовый портрет. Элементы теории бифуркаций.

8. Правила Кирхгофа. Линейные и нелинейные цепи. Амплитудная, частотная и фазовая модуляции. Модификация спектра при модуляции сигнала. Модуляция как нелинейный (или параметрический) процесс. Пример из оптики: комбинационное рассеяние света. Детектирование и гетеродинирование сигнала. Модификация спектра при детектировании. Квадратичный детектор. Оптическое гетеродинирование.

9. Обобщенные координаты, метод Лагранжа. Электромеханические аналогии. Квазистационарные процессы. Линейные фильтры, частотная, амплитудная и фазовая характеристики. Колебательный контур как гармонический осциллятор.

10. Свободные колебания в линейном контуре с затуханием. Безразмерная форма уравнения затухающих колебаний. Логарифмический декремент. Принцип подобия и частота колебаний затухающего осциллятора. Сектор частот собственных колебаний гармонического осциллятора. Лоренцева форма спектральной линии.

11. Фазовый портрет системы с затуханием. Устойчивый и неустойчивый фокусы и узлы. Метод медленно меняющихся амплитуд. Критический режим колебаний. Затухание свободных колебаний в нелинейных системах. Фазовый портрет физического маятника с затуханием.

12. Вынужденные колебания в линейных системах. Метод комплексных амплитуд. Параллельный и последовательный колебательные контуры. Безразмерные параметры колебательного контура: характеристическое (волновое) сопротивление. Резонансные кривые тока, напряжения и мощности. Резонанс токов и напряжений. Добротность колебательного контура, его связь с логарифмическим декрементом и шириной резонансной

кривой по мощности. Вынужденные колебания в линейных системах под действием негармонической силы. Дискриминаторы фазовой и частотной модуляции.

13. Резонанс осциллятора со слабой нелинейностью (Метод Дюффинга). Автогенератор. Линейный и нелинейный режимы работы. Фазовая плоскость автогенератора, предельный цикл. Бифуркация Андронова-Хопфа. Исследование нелинейного режима методом медленно меняющихся амплитуд. Метод Ван дер Поля, комплексная модификация.

13. Колебание систем с двумя степенями свободы. Биение. Нормальные моды колебаний. Связь и связанность. График Вина. Колебание под действием вынуждающей силы. Антирезонанс. Гашение колебаний. Связь по затуханию. Эффект Дикке.

14. Параметрические колебания. Два предельных случая параметрических колебаний (адиабатическое приближение и мгновенное изменение параметров). Гармоническое изменение параметров: уравнение Матье и Хила, их связь. Теорема Флоке. Параметрический резонанс.

15. Электрические флуктуации. Тепловой и дробовой шум. Белый шум, Теорема Найквиста. Предел чувствительности измерительных приборов.

16. Эвристическое обоснование линейного волнового уравнения. Основные свойства волн, наблюдаемые экспериментально. Поперечные и продольные волны. Гармоническая волна, как следствие однородности и изотропности пространства, а также принципа суперпозиции.

17. Характеристики гармонической волны: амплитуда, длина волны, частота. Уравнение простой волны. Волновое уравнение. Принцип «бритвы Окамы». Операторная форма волнового уравнения, его факторизация и решение для бесконечной среды. Задача Коши.

18. Дисперсия волн: анализ на основе размерности. Гравитационная волна, капиллярная волна. Что такое скорость волны? Выделенное положение волн сохраняющих при распространении форму. Нормальные волны среды. Солитоны. Фазовая и групповая скорость волн в линейной среде с дисперсией. Волны конечной амплитуды (слабая нелинейность): решение Римана.

19. Акустическая (продольная) волна. Локальное термодинамическое равновесие. Полная система уравнений акустики для идеальной сплошной среды. Линейное приближение уравнений акустики. Определяющие параметры звуковой волны. Скорости и волнового сопротивления акустической волны. Поток энергии и импульса в звуковой волне. Теорема Умова. Сопоставление с экспериментом.

20. Колебания струны (поперечная волна). Требования к характеристикам струны для реализации линейного режима колебаний. Линейное волновое уравнение. Особенности перехода к линейному приближению: преобразование Галилея и преобразование Лоренца. Граничная задача. Метод Фурье. Полнота системы функций задачи Штурма-Лиувилля и принцип суперпозиции. Нормальные моды колебаний струны. Их независимость. Основная мода. Осцилляторная теорема. Закон сохранения энергии:

консервация энергии в нормальных модах и ортогональность решений для нормальных мод.

21. Двухпроводная линия – пример неквазистационарной цепи. Погонные параметры и область применимости. Определяющие параметры: анализ размерности. Скорость распространения волны и волновое сопротивление. Телеграфные уравнения. Длинная линия без затухания: связь токов и напряжений. Отражение волны от нагрузки. Режим холостого хода, короткого замыкания и бегущей волны (согласованная нагрузка). Отражение на неоднородностях линии. Парадокс напряжения.

22. Гармоническое возбуждение длинной линии. Метод комплексных амплитуд. Входное сопротивление линии. Согласование волнового сопротивления линии и нагрузки. Резонансные свойства двухпроводной линии. Приближение сосредоточенных параметров. Двухпроводная линия с затуханием. Дисперсия волн. Распространения импульса без изменения формы.

23. Система уравнений Максвелла и ее общие свойства. Граничные условия, материальные уравнения. Теорема Пойнтинга. Пример материального уравнения для случая плазмы. Плазменная частота и Дебаевский радиус. Модель среды Максвелла.

24. Волновое уравнение как следствие уравнений Максвелла. Основные типы модельных волн электродинамики: плоская, цилиндрическая и сферическая волна. Решение для плоской волны. Ее свойства: поперечность, поляризация (плоская и круговая), фазовая скорость, волновое сопротивление и т.д. Отражение волны от поверхности металла: скин-слой, структура стоячей волны, эксперименты Винера. Давление излучения.

25. Сферическая волна. Задача излучения. Условия излучения (принцип причинности, принцип поглощения, условие Зоммерфельда). Дипольное и магнитодипольное излучение (качественно, на основе принципа размерности). Диаграмма направленности излучения, зависимость мощности излучения от частоты. Формула Лармора. Добротность атомного излучателя. Причины затухания, радиационное трение.

26. Отражение электромагнитной волны от границы раздела двух сред. Геометрическая оптика. Формулы Френеля. Угол Брюстера. Полное внутреннее отражение. Нарушенное полное внутреннее отражение (туннелирование электромагнитных волн).

27. Рассеяние электромагнитных волн на неоднородностях среды. Индикатриса рассеяния излучения с естественной поляризацией (рассеяние Тинделя). Оптическая теорема и ее следствия: неизбежность затухания, конечная величина затухания. Еще раз о радиационном трении. Частные случаи рассеяния. Рассеяние Томпсона (классический радиус электрона), рассеяние Лоренца (гармонический осциллятор), рассеяние Релея – Ганса.

28. Нормальные волны среды. Тензор диэлектрической проницаемости анизотропной и изотропной – гиротропной сред. Распространение электромагнитных волн в одноосном кристалле. Обыкновенная и необыкновенная волна. Гиротропная среда: вращение плоскости

поляризации.

29. Нелинейные эффекты при распространении электромагнитных волн. Самофокусировка. Генерация второй гармоники как параметрический интерференционный эффект. О методе комплексных амплитуд. Условие синхронизма.

30. Цилиндрические волны. Классификация мод в одно-связанном волноводе. Качественная картина распространения волны. Волновод прямоугольного сечения. Дисперсия волн в волноводе. Критическая частота (длина волны). СВЧ – резонаторы.

31. Распространение электромагнитных волн в среде с дисперсией. Дисперсионное уравнение. Взаимно однозначное соответствие волнового и дисперсионного уравнения. Модель среды Лоренца и ее свойства. Плазменные колебания. Почему плазмон не излучает? Построение приближенных уравнений на основе дисперсионного уравнения.

32. Основные особенности микромира: дискретность спектра энергий и интерференция. Энергия системы, как дисперсионное соотношение. Импульсное и координатное представление уравнения Шредингера. Соотношение неопределенности как следствие импульсного и координатного представления. Свободная частица в квантовой механике: ее состояние и связь с экспериментом.

33. Задача рассеяния частиц в квантово-механической постановке. Истолкование волновой функции как плотности вероятности. Плотность потока частиц в квантовой механике и закон сохранения частиц. Борновское приближение в теории рассеяния (аналог приближения Релея в оптике).

34. Дискретный спектр энергетических уровней – задача на собственные значения. Общие свойства решений уравнения Шредингера. Оператор Гамильтона. Динамические переменные и соответствующие им операторы. Плотность вероятности и средние величины динамических переменных. Квантование как следствие граничных условий.

35. Рассеяние частицы на потенциальной ступени. Граничные условия для идеализированного бесконечного потенциала. Простейшее решение Уравнения Шредингера. Бесконечная потенциальная яма. Общие свойства решений: основное состояние, вырождение, четность, осциляторная теорема. Модель Томаса – Куна для сопряженных связей в органической молекуле.

36. Прямоугольная потенциальная яма конечной глубины. Проблема существования связанного состояния в одномерной потенциальной яме. Рассеяние на прямоугольном потенциальном барьере и прямоугольной потенциальной яме. Данные рассеяния. Комплексная плоскость. Данные рассеяния и связанные состояния. Полупроводниковые гетероструктуры. Квантовые ямы и квантовые точки.

37. Прохождение частиц сквозь потенциальный барьер (туннелирование). «Парадокс» подбарьерного тока. Проникновение без отражения. Эффект Рамзауэра. Аналогия с интерферометром Фабри-Перо. Модель металла Зоммерфельда. Работа выхода, автоэлектронная эмиссия. Квазистационарные состояния.

38. Прохождение частиц сквозь «квантовые каналы». Что такое сплошная среда? Решение в виде цилиндрической волны. Минимальная энергия проникновения как критическая частота волновода.

39. Трехмерная задача (исследование s-состояний). Сферическая потенциальная яма. Условие Иоста-Пайнса существования связанного состояния. Дейтон. Рассеяние с нулевым моментом количества движения. Амплитуда рассеяния и длина рассеяния. Атомная система единиц: безразмерные параметры теории атома. Уравнение Шредингера для кулоновского потенциала: решение для s-состояний.

40. Гармонический осциллятор. Представление Гейзенберга. Факторизация гамильтониана. Операторы рождения и уничтожения. Пространство Фока. Когерентные состояния – аналог классических состояний гармонического осциллятора.

Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестации по дисциплине

Критерии оценивания для зачета

Оценка «зачтено». Систематическое посещение занятий в течение учебного года - аспирант посетил более 75% аудиторных занятий. В процессе обучения показал заинтересованность в предмете.

Оценка «не зачтено». Пропущено значительное количество занятий без уважительной причины - аспирант посетил менее 75% аудиторных занятий. В процессе обучения не проявил интереса к предмету.

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

6.1. Основная литература

1. Карлов, Н. В. Колебания, волны, структуры / Н. В. Карлов, Н. А. Кириченко. – Москва: Физматлит, 2008. – 497 с.: ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68395>. – ISBN 978-5-9221-0205-6. – Текст: электронный.

2. Горелик, Г. С. Колебания и волны: учебное пособие / Г. С. Горелик. – 3-е изд. – Москва: Физматлит, 2007. – 656 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68389>. – ISBN 978-5-9221-0776-1. – Текст: электронный.

3. Пинский, А. А. Основы физики: учебник / А. А. Пинский, Б. М. Яворский ; ред. Ю. И. Дик. – 5-е изд., стер. – Москва: Физматлит, 2003. – Том 2. Колебания и волны. Квантовая физика. Физика ядра и элементарных частиц. – 551 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82665>. – ISBN 5-9221-0383-0. – Текст: электронный.

6.2. Дополнительная литература

1. Колебания и волны в сплошных средах: сборник тестовых заданий: учебное пособие: [16+] / В. Г. Дубровский, Н. Б. Орлова, Г. М. Остреннов [и

др.] ; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2019. – 72 с.: ил., табл., граф., схем. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=576653>. – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-7782-3878-7. – Текст: электронный.

2. Владимиров, В. С. Уравнения математической физики: учебник / В. С. Владимиров, В. В. Жаринов. – Москва: Физматлит, 2000. – 400 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=68126>. – ISBN 5-9221-0011-4. – Текст: электронный.

6.3. Электронные образовательные ресурсы

1.	www.biblioclub.ru	Электронно-библиотечная система (ЭБС) Университетская библиотека онлайн	Регистрация через любой университетский компьютер. В дальнейшем предоставляется неограниченный индивидуальный доступ из любой точки, в которой имеется доступ к сети Интернет
2.	www.elibrary.ru	Российский информационный портал в области науки, технологии, медицины и образования	Свободный доступ

7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы.