

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ

ОДОБРЕНО НТС ЛАПЛАЗ

Протокол № 1/04-577

от 27.04.2023 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

**ТЕОРИЯ КОЛЕБАНИЙ В КВАНТОВОЙ РАДИОФИЗИКЕ**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 16.03.02 Высокотехнологические плазменные и  
энергетические установки

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/В СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
6	2	72	30	30	0	12	0	3
Итого	2	72	30	30	0	0	12	0

## АННОТАЦИЯ

Курс связывает фундаментальные знания, полученные студентами по математике и физике на младших курсах с изучением основных курсов: «Квантовая радиофизика» «Теоретическая квантовая радиофизика», «Атомная и молекулярная спектроскопия», «Методы лазерной диагностики» и других. Знание курса обеспечивает глубокое понимание физики лазеров как многомерных колебательных оптических систем. Курс подкрепляется двумя кафедральными физическими практикумами – по физической оптике и по физике лазеров.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения учебной дисциплины являются изучение различных колебательных процессов в природе, выявления их фундаментальных причин, классификация, знакомство с основными теоретическими методами описания и расчета параметров колебательных систем. Рассматриваются механические и электрические колебания, колебания в оптике и в лазерной физике.

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Курс связывает фундаментальные знания, полученные студентами по математике и физике на младших курсах с изучением основных курсов: «Квантовая радиофизика» «Теоретическая квантовая радиофизика», «Атомная и молекулярная спектроскопия», «Методы лазерной диагностики» и других. Знание курса обеспечивает глубокое понимание физики лазеров как многомерных колебательных оптических систем. Курс подкрепляется двумя кафедральными физическими практикумами – по физической оптике и по физике лазеров.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
		расчетно-экспериментальный с элементами научно-исследовательского	
Использование основных законов физики, оптики,	Параметры и характеристики физических	ПК-1.1 [1] - Способен использовать основные законы физики, оптики,	З-ПК-1.1[1] - Знать: основные понятия и законы физики

лазеров и плазмы для описания и оценок параметров и характеристик исследуемых физических объектов.	объектов.	лазеров и плазмы для описания и оценок параметров и характеристик исследуемых физических объектов.  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011	оптики, лазеров и плазмы, основные понятия, законы и модели, используемые для описания, изучения и оценки параметров и характеристик исследуемых физических объектов ; У-ПК-1.1[1] - Уметь: применять основные законы физики оптики, лазеров и плазмы для описания и оценок параметров и характеристик исследуемых физических объектов ; В-ПК-1.1[1] - Владеть: методами получения и анализа экспериментальных данных на основе законов физики оптики, лазеров и плазмы, используемые для описания, изучения и оценки параметров и характеристик исследуемых физических объектов.
--	-----------	--	---

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания Профессиональное воспитание	Задачи воспитания (код)  Создание условий, обеспечивающих, формирование ответственности за профессиональный выбор, профессиональное развитие и профессиональные решения (В18)	Воспитательный потенциал дисциплин Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования у студентов ответственности за свое профессиональное развитие посредством выбора студентами индивидуальных образовательных траекторий, организации системы общения между всеми участниками образовательного процесса, в том числе с использованием новых информационных технологий.
--	---	--

## 5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практик. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>6 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	18/12/0		25	КИ-8	З-ПК-1.1, У-ПК-1.1, В-ПК-1.1
2	Часть 2	9-15	12/18/0		25	КИ-15	З-ПК-1.1, У-ПК-1.1, В-ПК-1.1
	<i>Итого за 6 Семестр</i>		30/30/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 6 Семестр</b>				50	З	З-ПК-1.1, У-ПК-1.1, В-ПК-1.1

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
КИ	Контроль по итогам
З	Зачет

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недел и	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем. , час.	Лаб., час.
	<i>6 Семестр</i>	30	30	0
<b>1-8</b>	<b>Часть 1</b>	18	12	0
1	<b>Введение</b> Многообразие колебательных процессов в природе и практической деятельности человека. Фундаментальные причины колебаний в механике, электромагнетизме и оптике, лазерной физике. История теории колебаний.	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
2	<b>Собственные линейные колебания.</b> Условия для линейных колебаний в механике. Электромеханическая аналогия. Комплексное представление колебаний. Применение рядов и интегралов Фурье в комплексной форме. Колебания в консервативных системах. Затухающие и нарастающие колебания. Спектральное представление. Фазовые диаграммы. Разряд конденсатора. Порог генерации радиогенератора	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
3	<b>Вынужденные линейные колебания.</b> Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики. Явление резонанса. Применение метода вариации постоянных. Колебания под действием удара. Использование $\square$ - функций.	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
4 - 5	<b>Многомерные линейные колебания.</b> Колебания в консервативных системах, нормальные координаты и нормальные колебания. Колебания молекул. Собственные и вынужденные колебания в механических и электрических цепочках. Волновое сопротивление. Многозвенные электрические фильтры.	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
6 - 7	<b>Линейные колебания в оптике</b> Уравнения Максвелла. Волновое уравнение, электромагнитные волны, фазовая скорость света. Распространение света в материальной среде. Коэффициент поглощения и показатель преломления. Закон Бугера. Поляризация среды, линии поглощения и дисперсии в модели атома как затухающего электронного осциллятора. Спектр спонтанного излучения.	Всего аудиторных часов		
		6	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
8	<b>Линейные колебания в лазерной физике.</b> Спектр оптического резонатора, моды, собственные частоты, полоса и добротность резонатора. Усиление активной среды. Спонтанное излучение в резонаторе с активной средой, формирование генерации лазера.	Всего аудиторных часов		
		0	0	0
		Онлайн		
		0	0	0
<b>9-15</b>	<b>Часть 2</b>	12	18	0
9 - 11	<b>Нелинейные колебания.</b> Колебания в консервативных системах, вычисление периодов колебаний и ротаций. «Точная» теория маятника. Колебания в диссипативных системах, метод поэтапного рассмотрения. Ангармонизм колебаний. Резонансы в нелинейных колебательных системах. Метод Лъенара.	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
11 - 13	<b>Автоколебания.</b>	Всего аудиторных часов		

	Условия для автоколебаний, представление о предельных циклах. Системы томпсоновского типа. Метод медленно меняющихся амплитуд и фаз. Радиогенератор. Модель Ван-дер-Поля. Вырожденные системы, разрывные и релаксационные колебания. Скрип и скрипка. Лазер как оптический автогенератор.	3	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
14 - 16	<b>Параметрические колебания</b> Примеры параметрически возбуждаемых колебаний. Анализ уравнений Хилла и Матье. Условия параметрического возбуждения. Необходимость учета нелинейных свойств возбуждаемой системы. Представление о параметрических генераторах и усилителях.	Всего аудиторных часов		
		6	12	0
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При реализации программы дисциплины используются различные образовательные технологии – во время аудиторных занятий занятия проводятся в форме продвинутых лекций с использованием технических средств обучения - лекций с визуализацией.

Для контроля усвоения студентом разделов данного курса используются тестирование и написание реферата.

Самостоятельная работа студентов подразумевает под собой проработку лекционного материала с использованием рекомендуемой литературы.

## 7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)

ПК-1.1	З-ПК-1.1	З, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-1.1	З, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-1.1	З, КИ-8, КИ-15

### Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – <i>«отлично»</i>	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – <i>«хорошо»</i>	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		C	
70-74		D	
65-69	3 – <i>«удовлетворительно»</i>	E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 – <i>«неудовлетворительно»</i>	F	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

## 8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

#### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ Д 79 Колебания и волны : , Санкт-Петербург: Лань, 2022
2. 53 Л22 Теоретическая физика Т.1 Механика, Москва: Физматлит, 2013
3. ЭИ Б 15 Теория колебаний : учебное пособие для вузов, Москва: Юрайт, 2022
4. ЭИ А 45 Теория линейных и нелинейных колебаний : , Санкт-Петербург: Лань, 2022
5. 537 З-43 Принципы лазеров : , О. Звелто, Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2008

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 534 А66 Теория колебаний : , А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин, М.: Наука, 1981
2. 534 О-75 Основы теории колебаний : , Мигулин В.В.,Медведев В.И.,Мустель Е.Р.,Парыгин В.Н., М.: Наука, 1988

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

#### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

### **9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

### **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

При реализации программы дисциплины используются различные образовательные технологии – во время аудиторных занятий занятия проводятся в форме продвинутых лекций с использованием технических средств обучения - лекций с визуализацией.

Для контроля усвоения студентом разделов данного курса используется тестирование.

Самостоятельная работа студентов подразумевает под собой проработку лекционного материала с использованием рекомендуемой литературы для подготовки к тестам и написания рефератов.

Студентам перед началом занятий надо учесть, что несмотря на достаточно большое количество учебников по теории колебаний, написанных в различных специализированных учебных заведениях, полноценного учебника по данному курсу в рамках программы «Лазерная физика» не существует. Поэтому следует аккуратно посещать лекции, перед очередной лекцией прорабатывать предыдущий материал и не стесняться задавать вопросы преподавателю. Для успешного усвоения материала следует освежить в памяти следующие разделы математики:



теорию линейных дифференциальных уравнений, ряды и интегралы Фурье, и основы теоретической механики. В процессе изучения предмета основное внимание следует уделить теоретическим методам анализа колебаний, и в первую очередь - методу медленно меняющихся амплитуд и фаз. Владение им будет очень полезно в дальнейшем при изучении курса «Теоретическая квантовая электроника»

## 11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

Во введении следует обратить внимание студентов на повсеместность колебаний и колебательных систем в природе и практической деятельности человека. Надо показать, что возможность колебательных процессов вытекает из фундаментальных законов природы на примере теоретической механики и электродинамики. Обосновать необходимость возникновения теории колебаний как самостоятельной науки, тесно связанной с другими разделами физики, и в первую очередь с оптикой и лазерной физикой. Провести краткий обзор развития теории колебаний.

В первой части курса, посвященной линейной теории колебаний, целесообразно обратиться к наиболее знакомым и понятным механическим колебательным системам, введя развернутое представление о силах трения и диссипативной функции Рэлея. Следует проанализировать условия применимости линейной теории колебаний в механике. Затем целесообразно из правила Кирхгофа вывести уравнение для тока в электромагнитном контуре с внешним возбуждением и, сравнивая его с уравнением движения одномерной механической колебательной системы, провести электромеханическую аналогию. Тем самым будут обобщены представления о колебаниях в этих системах. Рассмотреть консервативные и автономные системы. Напомнить понятия об устойчивом и неустойчивом равновесии и ввести понятия об обыкновенной и асимптотической устойчивости. Ввести представление о фазовом пространстве и показать фазовые диаграммы для рассмотренных простейших систем, продемонстрировав возможности для анализа более сложных систем.

Перед анализом вынужденных колебаний целесообразно напомнить математический аппарат рядов и интегралов Фурье, имея в виду, что спектральные представления и навыки оперировать ими у студентов весьма ограничены. Предложить использовать комплексное представление как более компактное и удобное. Продемонстрировать эти возможности при вычислении спектров затухающих и нарастающих колебаний и использовать для анализа вынужденных колебаний под действием периодической и непериодической внешней силы. Затем следует напомнить о методе вариации постоянных при решении неоднородных линейных дифференциальных уравнений и использовать его для анализа вынужденных колебаний при импульсном воздействии. Показать физический смысл  $\square$  - функции как присоединенной функции.

При изложении собственных колебаний в многомерных консервативных системах надо дать студентам представление о нормальных координатах, нормальных колебаниях (типах колебаний, модах) и собственных частотах. Полезно проиллюстрировать эти понятия на примере колебаний в молекуле CO<sub>2</sub>. Проанализировать собственные и вынужденные колебания в линейных цепочках осцилляторов на примерах пружинно связанных маятников и электромагнитных контуров, связанных переходными емкостями. Еще раз продемонстрировать справедливость электромеханической аналогии. Ввести понятие о волновом сопротивлении цепочек и как частный случай вывести волновое сопротивление электрической кабельной линии.

Вторая часть курса посвящена рассмотрению линейных колебаний в оптике и лазерной физике, вопросов, имеющих важное значение для подготовки специалистов по лазерной физике. Начать изложение следует с фундаментальных уравнений Максвелла и материальных с использованием международной системы единиц. Это позволяет после вывода волнового уравнения показать связь фазовой скорости света с электрической и магнитной постоянными. В рамках курса достаточно ограничиться случаем плоских волн и непроводящей, немагнитной однородной и изотропной разреженной среды. После рассмотрения плоских волн в открытом резонаторе с учетом граничных условий на зеркалах дается представление о модах резонатора, их собственных частотах и добротности резонатора. Рассматривая материальные частицы в простой модели неподвижных затухающих электронных осцилляторов нетрудно получить частотные зависимости для показателя преломления и коэффициента поглощения (усиления) однородной среды. Можно указать на соотношения Крамерса – Кронига, связывающие эти зависимости. Рассматривая в классическом представлении излучение затухающих осцилляторов, случайно и независимо друг от друга возникающих, можно вывести форму спектра спонтанного излучения активных частиц в свободном пространстве и в открытом резонаторе с поглощающей и усиливающей средой. Показывается эффект сужения линий спонтанного излучения и преобразования их в монохроматические компоненты при увеличении усиления в среде. Определяется порог генерации лазера.

В третьей части курса рассматриваются основы нелинейной теории колебаний. Целесообразно начать с консервативных систем, для которых непосредственно из закона сохранения энергии можно вычислить периоды колебаний и вращений одномерной колебательной системы. В качестве простого примера вычисляется период колебаний математического маятника. Затем рассматривается ангармонизм колебаний в общем виде: появление высших гармоник и изменение их частот с ростом амплитуды колебаний. Для диссипативных нелинейных колебательных систем вводится представление о методе поэтапного рассмотрения колебаний на примере колебаний с сухим трением. Затем излагается метод Льенара и приводятся примеры построения фазовых диаграмм с его использованием для ряда диссипативных систем. Обсуждаются условия возникновения автоколебаний. Дается представление об устойчивых и неустойчивых предельных циклах на фазовой плоскости, о мягком и жестком возбуждении автоколебаний. Вводится классификация автоколебательных систем как систем томпсоновского типа и вырожденных. Для расчета автоколебательных систем томпсоновского типа предлагается метод медленно меняющихся амплитуд и фаз. В качестве примеров его использования рассчитывается электрический генератор синусоидальных колебаний и механический генератор звука (пример - скрипка). Рассчитывается интенсивность генерации в одномодовом лазере.

Для анализа вынужденных колебаний в нелинейных колебательных системах приводится метод гармонического баланса. Рассматриваются системы с не квадратичной зависимостью потенциальной энергии от обобщенной координаты и с коэффициентом сопротивления, зависящим от обобщенной скорости. Показывается, что в первом случае резонансные кривые «искривлены» - максимум перемещается по частоте с ростом амплитуды возмущающей обобщенной силы. Это приводит к возможному наблюдению гистерезисных явлений. Во втором случае резонансные кривые сохраняют свою симметрию, но уширяются и появляется постоянная составляющая, квадратично растущая с амплитудой возмущающей силы. Проводится параллель с полевым уширением линии усиления активной среды в лазере. Обсуждаются условия, при которых частота томпсоновского генератора может синхронизоваться сигналом другого генератора.

В конце курса рассматриваются параметрически возбуждаемые колебания. Общий анализ возможности таких колебаний проводится на основе уравнения Хилла. Условия для их возбуждения определяются при анализе уравнения Матье. Показывается, что рост амплитуды параметрически возбуждаемых колебаний ограничивается только нелинейностями в системе. В качестве примера рассматривается электрический генератор с конденсатором в задающем контуре, содержащем сегнетоэлектрик. Дается качественное представление о параметрических усилителях.

Самостоятельная работа студентов необходима для закрепления полученных теоретических знаний. Формой ее является подготовка рефератов по предложенным темам.

Автор(ы):

Козин Геннадий Иванович, к.ф.-м.н., с.н.с.