

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Полярный геофизический институт»  
(ПГИ)



УТВЕРЖДАЮ:

Врио директора  
ПГИ

*Б.В. Козелов*  
Б.В.Козелов

« 03 » *октября* 2016 г.

Рабочая программа дисциплины (модуля)

Динамика нелинейных систем

Направление подготовки кадров высшей квалификации  
16.06.01 Физико-технические науки и технологии

Направленность образовательной программы  
**01.04.03 Радиофизика,**  
**01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»**

Квалификация (степень) выпускника  
Исследователь. Преподаватель-исследователь

Форма обучения  
очная

Апатиты, Мурманск

2016

## **1. Место и цели дисциплины (модуля) в структуре ООП аспирантуры**

Дисциплина «Динамика нелинейных систем» относится к вариативной части ООП (дисциплина по выбору) и осваивается в течение 2 семестра третьего года очной аспирантуры по направлению подготовки 16.06.01 «Физико-технические науки и технологии», направленности - 01.04.03 «Радиофизика» и 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы». Материал дисциплины опирается на ранее приобретенные знания и позволяет аспиранту получить углубленные знания и навыки для успешной профессиональной деятельности.

### **Целями освоения дисциплины являются:**

формирование у аспирантов углубленных теоретических знаний в области поведения нелинейных динамических систем, представлений о современных актуальных проблемах и методах их решения, а также умения самостоятельно формулировать научные проблемы и находить нестандартные методы их решения.

В рамках курса решаются следующие задачи:

- углубленное изучение теоретических вопросов в области анализа поведения нелинейных динамических систем в соответствии с ФГОС ВО по направлению «Физико-технические науки и технологии»;
- развитие общепрофессиональных компетенций в области современной радиофизики в соответствии с ФГОС ВО по направлению «Физико-технические науки и технологии»;
- освоение методов обработки и анализа сигналов, методов нелинейной динамики и анализа нелинейных, нестационарных систем.

## **2. Результаты обучения, определенные в картах компетенции и формируемые по итогам освоения дисциплины**

Процесс изучения дисциплины «Динамика нелинейных систем» направлен на формирование следующих профессиональных компетенций:

ПК-1: способность к построению и исследованию моделей механики жидкости, газа и плазмы на основе глубокого знания соответствующего математического аппарата;

ПК-2: готовность к проведению экспериментальных исследований и интерпретации экспериментальных данных в области механики жидкости, газа и плазмы;

ПК-3: владение методологией и культурой научного исследования в области механики жидкости, газа и плазмы, в том числе с использованием новейших информационно-коммуникационных технологий.

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
<b>ПК-1.ДНС</b>	<p><i>З1 (ПК-1.ДНС)</i> Знать основы физики процессов, обуславливающих динамику жидкости, газа и плазмы; знать методы нелинейной динамики;</p> <p><i>У1 (ПК-1.ДНС)</i> Уметь самостоятельно получать эволюционные уравнения колебательных и волновых систем, исходя из уравнений для физических закономерностей и накладываемых на систему ограничений, находить стационарные решения, проводить анализ их устойчивости, находить численные решения эволюционных уравнений с использованием базовых численных методов;</p> <p><i>В1 (ПК-1.ДНС)</i> Владеть навыками построения математических моделей колебательных и волновых систем, основными методами бифуркационного анализа динамических систем, методами анализа устойчивости систем;</p>
<b>ПК-2.ДНС</b>	<p><i>З2 (ПК-2.ДНС)</i> Знать основы физики процессов, происходящих в системах с нелинейной динамикой и сложным поведением; современные методы анализа временных рядов; методы предсказания поведения систем и реконструкции динамических систем;</p> <p><i>У2 (ПК-2.ДНС)</i> Уметь свободно применять полученные знания по математическому моделированию колебательных и волновых систем, проводить анализ и сопоставление разных способов моделирования; проводить всесторонние исследования динамики и эволюции моделей, учитывать влияние шумов и флуктуаций;</p> <p><i>В2 (ПК-2.ДНС)</i> Владеть современными методами математического моделирования, учитывающего специфику рассматриваемых систем; методами нелинейной динамики и статистического анализа динамических и стохастических систем.</p>
<b>ПК-3.ДНС</b>	<p><i>З3 (ПК-3.ДНС)</i> Знать основы физики процессов, происходящих в системах с нелинейной динамикой и сложным поведением; методологии научного исследования в области механики жидкости, газа и плазмы;</p> <p><i>У3 (ПК-3.ДНС)</i> Уметь свободно применять полученные знания по методологии научного исследования в области механики жидкости, газа и плазмы;</p> <p><i>В3 (ПК-3.ДНС)</i> Владеть методологией и культурой научного исследования в области механики жидкости, газа и плазмы, в том числе с использованием новейших информационно-коммуникационных технологий.</p>

Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования приведено в Приложении 1.

#### 4. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 часа

№ п/п	Раздел дисциплины	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу аспирантов и трудоемкость (в часах)			Формы текущего контроля успеваемости (по темам) Формы промежуточной аттестации
		лекц ии	прак тиче ские	СР	
1	<b>Теория динамических систем</b>				
1.1	Введение. Общие положения теории динамических систем	2	1	3	Отчет по практическим заданиям
1.2	Основные понятия теории устойчивости и бифуркаций	3	1	4	Отчет по практическим заданиям
1.3	Динамические системы с одной степенью свободы	2	1	3	Отчет по практическим заданиям
1.4	Системы с размерностью фазового пространства $N > 3$ . Детерминированный хаос. Генератор хаоса с инерционной нелинейностью	2	2	3	Отчет по практическим заданиям
1.5	Бифуркационные сценарии возникновения хаоса	2	1	4	Отчет по практическим заданиям
1.6	Грубые и негрубые динамические системы. Свойство гиперболичности и классификация аттракторов.	2	1	3	Отчет по практическим заданиям
1.7	Реконструкция ДС	2	1	3	Отчет по практическим заданиям
2	<b>Шум в динамических системах</b>				
2.1	Роль шума в динамических системах. Стохастические бифуркации и индуцированные шумом переходы	2	1	4	Отчет по практическим заданиям
2.2	Шум в периодических и хаотических автогенераторах	2	1	3	Отчет по практическим заданиям
2.3	Бистабильные осцилляторы и явление стохастического резонанса	3	1	3	Отчет по практическим заданиям
2.4	Синхронизация стохастических колебаний	2	1	3	Отчет по практическим заданиям
<b>Итого по всему курсу:</b>		24	12	36	Реферат

## Содержание дисциплины «Динамика нелинейных систем»

### Раздел 1. Теория динамических систем

#### Тема 1.1. Введение. Общие положения теории динамических систем (ЕС)

Обзор современных проблем нелинейной динамики и связанных с ней дисциплин. Роль концепций нелинейной динамики в развитии естествознания.

Динамическая система (ДС) и ее математическая модель. Определение динамической системы, классификация ДС. Колебательные системы и их свойства. Современный взгляд на классификацию колебательных систем. Автоколебания. Предельные множества фазового пространства. Понятие аттрактора диссипативной ДС. Регулярные, хаотические и странные аттракторы. Системы с дискретным временем. Отображения последования.

#### Тема 1.2. Теория устойчивости и бифуркаций

Определения различных типов устойчивости траекторий. Спектры ляпуновских характеристических показателей фазовых траекторий динамической системы. Устойчивость траекторий для различных предельных множеств: состояния равновесия, предельного цикла, инвариантного тора, хаотического аттрактора. Устойчивость решений в отображениях последования. Понятие бифуркации ДС. Классификация типичных бифуркаций в потоковых системах. Структурная устойчивость ДС. Бифуркации состояний равновесия. Бифуркации периодических решений. Нелокальные бифуркации в окрестности двоякоасимптотических траекторий. Бифуркации одномерных и двумерных отображений последования.

#### Тема 1.3. Динамические системы с одной степенью свободы

Предельные множества и аттракторы на фазовой плоскости. Предельный цикл Андронова-Пуанкаре Структурная устойчивость систем на фазовой плоскости. Системы Андронова-Понтрягина Генераторы с одной степенью свободы. Анализ уравнения Ван дер Поля. Возникновение автоколебаний. Генератор с жестким возбуждением.

#### Тема 1.4. Системы с размерностью фазового пространства $N > 3$ .

##### Детерминированный хаос. Генератор хаоса с инерционной нелинейностью

Условия возникновения детерминированного хаоса. Парадокс детерминированности и непредсказуемости. Свойство перемешивания и вероятностное распределение на хаотическом аттракторе. Фракталы в нелинейной динамике. Сложная геометрическая структура и экспоненциальная неустойчивость. Странные хаотические аттракторы и странные нехаотические и хаотические нестранные аттракторы. Модификация генератора с инерционной нелинейностью. Генератор хаоса Анищенко-Астахова.

#### Тема 1.5. Бифуркационные сценарии возникновения хаоса

Переход к хаосу через последовательность бифуркаций удвоения периода. Универсальность Фейгенбаума. Жесткие переходы к хаосу. Кризис и перемежаемость. Переход к хаосу через разрушение квазипериодических колебаний. Переход к хаосу через разрушение эргодического тора. Странные нехаотические аттракторы.

#### Тема 1.6. Грубые и негрубые динамические системы. Свойство гиперболичности и классификация аттракторов

Гомоклинические и гетероклинические кривые. Структурно-устойчивые системы в ИМ,  $N > 3$ . Свойство гиперболичности. Структурно-неустойчивые динамические системы. Квазигиперболические аттракторы. Аттракторы типа Лоренца. Квазиаттракторы и их свойства.

#### Тема 1.7. Реконструкция ДС

Определение размерности вложения и реконструкция аттрактора и расчет старшего показателя Ляпунова по временному ряду. Реконструкция динамической системы. Пример реконструкции динамической системы. Моделирование динамики сердечного ритма.

### Раздел 2. Шум в динамических системах

#### Тема 2.1. Роль шума в динамических системах. Стохастические бифуркации и индуцируемые шумом переходы

Общие представления о влиянии шума на динамические системы. Метод Ланжевена. Связь стохастических уравнений и уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова. Стационарное вероятностное распределение динамических переменных в системах с шумом. Стохастические аттракторы. Бифуркации в системах с шумом. Интенсивность шума как управляющий параметр системы. Индуцированные шумом переходы.

#### Тема 2.2. Шум в квазигармонических и хаотических автогенераторах.

Флуктуации в квазигармоническом генераторе с источником шума. Спектрально-корреляционный анализ автоколебаний в генераторах спирального хаоса. Влияние белого шума на хаотические автоколебания в режиме спирального аттрактора. Влияние шума на эффект синхронизации колебаний. Вынужденная синхронизация зашумленных автоколебаний внешней гармонической силой. Взаимная синхронизация квазигармонических автогенераторов в присутствии шума. Синхронизация хаотических автоколебаний в присутствии шума. Синхронизация автоколебаний узкополосным шумом.

#### Тема 2.3. Бистабильные осцилляторы и явление стохастического резонанса.

Бистабильные осцилляторы под действием шума. Физические основы эффекта стохастического резонанса, и характеристики эффекта стохастического резонанса. Теория линейного отклика и теория двух состояний. Стохастический резонанс в хаотических системах с сосуществующими аттракторами. Физический эксперимент. Стохастический резонанс в механорецепторах речного рака.

#### Тема 2.4. Синхронизация стохастических колебаний.

Внешняя синхронизация процесса переключений в бистабильном осцилляторе под действием шума и периодического сигнала. Внешняя стохастическая синхронизация триггера Шмитта. Внешняя и взаимная стохастическая синхронизация процессов переключений в хаотических системах. Вынужденная и взаимная синхронизация возбудимых систем. Стохастическая синхронизация как индуцированный шумом порядок.

## **5. Образовательные технологии, применяемые при освоении дисциплины**

В рамках изучения данной дисциплины реализация компетентного подхода предусматривает широкое использование в учебном процессе традиционных образовательных технологий, активных и интерактивных форм проведения занятий в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

Традиционные образовательные технологии:

- лекции.

Активные и интерактивные формы занятий:

- лекция - семинар.

В рамках изучения данной дисциплины используются:

- мультимедийные образовательные технологии: интерактивные лекции (презентации) с использованием программы OpenOffice;

Для обеспечения доступности обучения инвалидам и лицам с ограниченными возможностями здоровья в преподавании дисциплины могут быть использованы следующие адаптивные технологии: интернет-технологии и дистанционное обучение - для обучающихся с нарушениями опорно-двигательного аппарата; разноуровневое и дифференцированное обучение - для слабовидящих обучающихся. Подбор и разработку учебных материалов можно предоставлять в различных формах: для обучающихся с нарушениями слуха информацию можно представлять визуально, с нарушением зрения - аудиально. Для лиц с ограниченным зрением изображения мелких объектов можно представлять в форме презентаций. Общение преподавателей с обучающимся можно осуществлять с помощью дистанционных технологий (сети Интернет, электронной почты, социальных сетей).

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

### 6.1. Виды самостоятельной работы

Раздел/Тема дисциплины	Вид самостоятельной работы	Литература
<b>1. Теория динамических систем</b>	проработка конспектов лекций и вопросов, вынесенных на самостоятельное изучение с помощью основной и дополнительной литературы с привлечением компьютерных средств, конспектирование материалов, аннотирование научных публикаций, работа со справочной литературой	см. раздел 8 «Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины»
<b>2. Шум в динамических системах</b>	проработка конспектов лекций и вопросов, вынесенных на самостоятельное изучение с помощью основной и дополнительной литературы с привлечением компьютерных средств; конспектирование материалов, аннотирование научных публикаций, работа со справочной литературой	см. раздел 8 «Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины»
Итого часов на самостоятельную работу: 36 часов		

### 6.2. Вопросы для углубленного самостоятельного изучения

1. Устойчивость решений в система с дискретным временем.
2. Странные нехаотические и хаотические нестранные аттракторы.
3. Бифуркационный анализ синхронизации в фазовом приближении и с использованием системы укороченных уравнений.
4. Моделирование динамики сердечного ритма.
5. Волны в активных средах. Пространственные структуры и нелинейные волновые явления.
6. Лампа обратной волны: история создания и перспективы развития.
7. Хаос и управление им в лампе обратной волны (теория и численное моделирование).
8. Синхронизация автоколебаний узкополосным шумом.

### 6.3. Порядок выполнения самостоятельной работы

Самостоятельная подготовка к занятиям осуществляется регулярно по каждой теме дисциплины и определяется календарным графиком изучения дисциплины. Самостоятельная работа заключается в чтении и изучении литературы, подготовке к лекциям, в выполнении заданий лектора.

Рекомендуется:

- для качественного усвоения материала лекций разбирать вопросы, изложенные в каждой очередной лекции, до следующей, по непонятым деталям консультироваться у лектора, читать соответствующую литературу;
- при подготовке к семинарским занятиям пользоваться рекомендациями преподавателя, ведущего семинары, готовить краткий конспект по вопросам темы, изучать рекомендуемую основную и дополнительную литературу;
- задания, которые даются лектором во время лекции по отдельным вопросам, обязательны для выполнения, и качество их выполнения будет проверяться во время зачета.

При реализации программы дисциплины «Динамика нелинейных систем»

студентам предлагается выполнить обзор актуальной литературы в форме реферата с докладом на научном семинаре. Примерный перечень предлагаемых тем рефератов приведен в Приложении 2:

Рефераты выполняются под руководством научного руководителя и должны содержать элементы литературного обзора по теме, анализа в соответствии с конкретной спецификой выбранной темы.

## **7. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

### **7.1. Формы текущего контроля работы аспирантов**

Формами текущего контроля работы аспирантов по дисциплине «Динамика нелинейных систем» являются: домашнее задание, реферат.

### **7.2. Порядок осуществления текущего контроля**

Текущий контроль выполнения заданий осуществляется регулярно, начиная с 4 недели семестра. Контроль и оценивание выполнения реферата осуществляется на 15 неделе семестра. Текущий контроль освоения отдельных разделов дисциплины осуществляется при помощи заданий в завершении изучения каждого раздела. Система текущего контроля успеваемости служит в дальнейшем наиболее качественному и объективному оцениванию в ходе промежуточной аттестации.

### **7.3. Промежуточная аттестация по дисциплине**

Промежуточная аттестация проводится в форме зачетов.

### **7.4. Фонд оценочных средств**

Содержание фонда оценочных средств см. Приложение №2.

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

### **Основная литература:**

1. В.С. Анищенко, Сложные колебания в простых системах. Издательство "Наука", Москва, 1990, 312с, (<http://chaos.sgu.ru/~wadim/book.pdf>)
2. В.С. Анищенко, В.В. Астахов, Т.Е. Вадивасова. Регулярные и хаотические автоколебания. Синхронизация и влияние флуктуаций. Учебник-монография. - Долгопрудный: Издательский Дом "Интеллект", 2009. 312с ([http://library.sgu.ru/uch\\_lit/199.pdf](http://library.sgu.ru/uch_lit/199.pdf))
3. В.С. Анищенко, В.В. Астахов, Т.Е. Вадивасова, А.Б. Нейман, Г.И. Стрелкова, Л. Шиманский-Гайер, Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах. Под редакцией В.С. Анищенко - Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003, - 544 с. (<http://chaos.sgu.ru/~wadim/rcd.pdf>)

### **Дополнительная литература:**

1. В.С. Анищенко ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ: [www.pereplet.ru/nauka/Soros/pdf/9711\\_077.pdf](http://www.pereplet.ru/nauka/Soros/pdf/9711_077.pdf)
2. Павлов А.Н., Методы анализа сложных сигналов, Учебное пособие. Саратов, Изд-во Научная книга, 2008, 120 стр. ([http://library.sgu.ru/uch\\_lit/195.pdf](http://library.sgu.ru/uch_lit/195.pdf))
3. Д.Э. Постнов, А.Н. Павлов, С.В. Астахов, Методы нелинейной динамики. Учебное пособие, 120с., 2008. Электронное издание. ([http://library.sgu.ru/uch\\_lit/196.pdf](http://library.sgu.ru/uch_lit/196.pdf)) на сайте ЭБ УМЛ СГУ
4. А.В. Шабунин, Практикум по основам цифровой обработки сигналов. Учебно-методическое пособие для студентов-радиофизиков, 69 стр. 2008. Электронное издание. ([http://library.sgu.ru/uch\\_lit/197.pdf](http://library.sgu.ru/uch_lit/197.pdf)) на сайте ЭБ УМЛ СГУ



5. А.П. Кузнецов, С.П. Кузнецов, Н.М. Рыскин, Лекции по теории колебаний и волн. Нелинейные колебания. Саратов, 2011. (ЭБ учебно-методических пособий СГУ, [http://elibrary.sgu.ru/uch\\_lit/281.pdf](http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/281.pdf)).

#### **Рекомендованная литература:**

1. В.С. Анищенко, Т.Е. Вадивасова, Лекции по нелинейной динамике. - Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2010.
2. Н.М. Рыскин, Д.И. Трубецков, Лекции по теории колебаний и волн. Нелинейные волны. Саратов, 2011 (ЭБ учебно-методических пособий СГУ, [http://elibrary.sgu.ru/uch\\_lit/282.pdf](http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/282.pdf)).
3. Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е., Стрелкова Г.И. Синхронизация регулярных, хаотических и стохастических колебаний. 2008. 144 с.
4. Трубецков Д.И., Мчедлова Е.С., Красичков Л.В. Введение в теорию самоорганизации открытых систем. Изд.2. 2005. 212 с.
5. Э. Инфельд, Дж. Роуландс, Нелинейные волны, солитоны и хаос. М.: Физматлит, 2006.
6. М.И. Рабинович, Д.И. Трубецков. Введение В теорию колебаний и волн. М.- Ижевск, «Регулярная и хаотическая динамика», 2000.
7. Ю.И.Неймарк, П.С.Ланда. Стохастический и хаотический колебания. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009 (2-е издание).
8. А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. Теория колебаний. - М.: Наука, 1981.
9. В.И. Арнольд, Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1978
10. П.С. Ланда, Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы. М.: Наука, 1980.
11. П.С. Ланда, Нелинейные колебания и волны. - М.: Изд-во «Либроком», 2010.
12. А.Ю. Лоскутов, А.С. Михайлов, Основы теории сложных систем. - М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2007.
13. Р.Л. Стратонович, Случайные процессы в динамических системах. - М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2009.
14. Б. Мандельброт, Фрактальная геометрия природы. М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2002.
15. Дж. Гукенхаймер, П. Холмс, Нелинейные колебания, динамические системы и бифуркации векторных полей. Пер. с англ. УРСС, 2002. 560 с.

#### **Веб-сайты с электронными ресурсами:**

- eLIBRARY.RU [Электронный ресурс]: научная электронная библиотека. - URL: <http://www.elibrary.ru>
- Антиплагиат [Электронный ресурс]. - <http://www.antiplagiat.ru/>
- Саратовский госуниверситет: <http://course.sgu.ru>
- Научно-образовательный портал кафедры радиофизики и нелинейной динамики, СГУ: <http://chaos.sgu.ru/>
- Научная и учебная литература: <http://URSS.ru>

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

Для проведения занятий по дисциплине «Динамика нелинейных систем», предусмотренной учебным планом подготовки аспирантов, имеется необходимая материально-техническая база, соответствующая действующим санитарным и противопожарным правилам и нормам:

- учебная аудитория, оборудованная комплектом мебели, доской; комплект проекционного мультимедийного оборудования; офисная оргтехника.



Фонд оценочных средств по дисциплине «Динамика нелинейных систем»

Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования:

ПК-1: способность к построению и исследованию моделей механики жидкости, газа и плазмы на основе глубокого знания соответствующего математического аппарата;

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<p><u>Знания З1</u></p> <p>Знать основы физики процессов, обуславливающих динамику жидкости, газа и плазмы; знать методы нелинейной динамики.</p>	отсутствие каких-либо знаний в рамках данного материала	наличие грубых ошибок при изложении основного материала	знание основного материала с рядом негрубых ошибок	знание основного материала, однако с рядом заметных погрешностей	знание основного материала с незначительными погрешностями	знание основного материала без ошибок и погрешностей	знание основного и дополнительного материала без ошибок и погрешностей
<p><u>Умения У1</u></p> <p>Уметь самостоятельно получать эволюционные уравнения колебательных и волновых систем, исходя из уравнений для физических закономерностей и накладываемых на систему ограничений, находить стационарные решения, проводить анализ их устойчивости, находить численные решения эволюционных уравнений с использованием базовых численных методов</p>	Полная неспособность приступить к решению какой бы то ни было задачи в рамках указанного материала	Решение стандартных задач с грубыми ошибками.	Умение решать стандартные задачи с негрубыми ошибками	Умение решать стандартные задачи с неточностями, не носящими принципиального характера.	Умение решать стандартные задачи с незначительными погрешностями	Умение решать задачи повышенной сложности с незначительными погрешностями	Умение решать задачи повышенной сложности
<p><u>Навыки В1</u></p> <p>Владеть навыками построения математических моделей колебательных и волновых систем, основными методами бифуркационного</p>	Полное отсутствие соответствующих навыков	Владение навыками, однако с грубыми ошибками.	Владение навыками с негрубыми ошибками	Владение навыками с неточностями, не носящими принципиального характера	Владение навыками с незначительными погрешностями в стандартных ситуациях	Владение навыками с незначительными погрешностями в нестандартных ситуациях	Владение навыками в нестандартных ситуациях

анализа динамических систем, методами анализа устойчивости систем;							
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

ПК-2 – готовность к проведению экспериментальных исследований и интерпретации экспериментальных данных в области механики жидкости, газа и плазмы.

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Знания З2</u> Знать основы физики процессов, происходящих в системах с нелинейной динамикой и сложным поведением; современные методы анализа временных рядов; методы предсказания поведения систем и реконструкции динамических систем	отсутствие каких-либо знаний в рамках данного материала	наличие грубых ошибок при изложении основного материала	знание основного материала с рядом негрубых ошибок	знание основного материала, однако с рядом заметных погрешностей	знание основного материала с незначительными погрешностями	знание основного материала без ошибок и погрешностей	знание основного и дополнительного материала без ошибок и погрешностей
<u>Умения У2</u> Уметь свободно применять полученные знания по математическому моделированию колебательных и волновых систем, проводить анализ и сопоставление разных способов моделирования; проводить всесторонние исследования динамики и эволюции моделей, учитывать влияние шумов и флуктуаций	Полная неспособность приступить к решению какой-бы то ни было задачи в рамках указанного материала	Решение стандартных задач с грубыми ошибками.	Умение решать стандартные задачи с негрубыми ошибками	Умение решать стандартные задачи с неточностями, не носящими принципиального характера.	Умение решать стандартные задачи с незначительными погрешностями	Умение решать задачи повышенной сложности с незначительными погрешностями	Умение решать задачи повышенной сложности
<u>Навыки В2</u> Владеть современными методами	Полное отсутствие соответствующих	Владение навыками, однако с грубыми	Владение навыками с негрубыми ошибками	Владение навыками с неточностями, не носящими	Владение навыками с незначительными погрешно-	Владение навыками с незначительными погрешно-	Владение навыками в нестандартных ситуа-

математического моделирования, учитывающего специфику рассматриваемых систем; методами нелинейной динамики и статистического анализа динамических и стохастических систем.	навыков	ошибками.		принципиального характера	стями в стандартных ситуациях	стями в нестандартных ситуациях	циях
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

ПК-3 – владение методологией и культурой научного исследования в области механики жидкости, газа и плазмы, в том числе с использованием новейших информационно-коммуникационных технологий.

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Знания ЗЗ</u> Знать основы физики процессов, происходящих в системах с нелинейной динамикой и сложным поведением; методологии научного исследования в области механики жидкости, газа и плазмы	отсутствие каких-либо знаний в рамках данного материала	наличие грубых ошибок при изложении основного материала	знание основного материала с рядом негрубых ошибок	знание основного материала, однако с рядом заметных погрешностей	знание основного материала с незначительными погрешностями	знание основного материала без ошибок и погрешностей	знание основного и дополнительного материала без ошибок и погрешностей
<u>Умения УЗ</u> Уметь свободно применять полученные знания по методологии научного исследования в области механики жидкости, газа и плазмы	Полная неспособность приступить к решению какой-бы то ни было задачи в рамках указанного материала	Решение стандартных задач с грубыми ошибками.	Умение решать стандартные задачи с негрубыми ошибками	Умение решать стандартные задачи с неточностями, не носящими принципиального характера.	Умение решать стандартные задачи с незначительными погрешностями	Умение решать задачи повышенной сложности с незначительными погрешностями	Умение решать задачи повышенной сложности
<u>Навыки ВЗ</u> Владеть методологией и культурой научного исследования в области механики жидкости, газа и плазмы, в том числе с	Полное отсутствие соответствующих навыков	Владение навыками, однако с грубыми ошибками.	Владение навыками с негрубыми ошибками	Владение навыками с неточностями, не носящими принципиального	Владение навыками с незначительными погрешностями в стандарт-	Владение навыками с незначительными погрешностями в нестан-	Владение навыками в нестандартных ситуациях

использованием новейших информационно-коммуникационных технологий.				характера	ных ситуа- циях	дартных ситуациях	
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20 – 50 %	50 – 70 %	70-80 %	80 – 90 %	90 – 99 %	100%

### Описание шкал оценивания

Итоговый контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде экзамена, на котором определяется:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала;
- способности студентов использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Экзамен проводится в устной форме. Устная часть экзамена заключается в ответе студентом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ. Практическая часть экзамена предусматривает решение одной задачи по разделу курса, отличному от освещенных при ответе на теоретические вопросы.

Оценка	Уровень подготовки
Превосходно	Высокий уровень подготовки, безупречное владение теоретическим материалом. Студент дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит исчерпывающие, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение уверенно применять на практике приобретенные навыки, владение в полной мере методиками решения задач.  100 %-ное выполнение контрольных экзаменационных заданий
Отлично	Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Студент дает полный и развернутый ответ на все теоретические вопросы билета; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит почти полные, аргументированные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами. 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
Очень хорошо	Хорошая подготовка. Студент дает ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями; неполно отвечает на дополнительные вопросы; приводит достаточно аргументированные и почти полные решения всех сформулированных в билете задач с незначительными недочетами; или

	<p>исчерпывающее решение приводится только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена с заметными недочетами. 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 основными методиками решения задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 80 до 90%.</p>
Хорошо	<p>В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Студент дает полный ответ на все теоретические вопросы билета с небольшими неточностями, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит почти полные решения всех сформулированных в билете задач с некоторыми недочетами; или исчерпывающее решение приведено только для одной из двух задач билета, а вторая задача решена со значительными погрешностями. 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 80%.</p>
Удовлетворительно	<p>Минимально достаточный уровень подготовки. Студент показывает минимальный уровень теоретических знаний, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит неполные, слабо аргументированные решения всех сформулированных в билете задач. 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. Студент дает ошибочные ответы, как на теоретические вопросы билета, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора; приводит решения сформулированных в билете задач 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>
Плохо	<p>Подготовка абсолютно недостаточная. Студент не отвечает на поставленные вопросы, демонстрирует полное непонимание сформулированных в билете задач.</p> <p>Выполнение контрольных экзаменационных заданий менее 20 %.</p>

**Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций.**

**Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:**

- индивидуальное собеседование,
- устные и/или письменные ответы на вопросы.

**Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии:**

- практические контрольные задания (далее – ПКЗ), включающие одну или несколько задач.

По сложности ПКЗ разделяются на простые (стандартные) и комплексные задания. Простые ПКЗ предполагают решение в одно или два действия, применяются для оценки умений. Комплексные задания (задания повышенной сложности) требуют поэтапного решения и развернутого ответа с применением нестандартных подходов к решению. Комплексные практические задания применяются для оценки владений.



### Фонд оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации

#### Темы рефератов

1. **Основные математические модели теории колебаний.**
2. Модели ускорения Ферми.
3. Явление синхронизации: его изучение и диагностика.
4. Методы расчета ляпуновских показателей.
5. Примеры систем с хаотической динамики различной природы.
6. Основные сценарии возникновения динамического хаоса.
7. Фракталы. Приложения фракталов в физике и естественных науках.
8. Странные нехаотические аттракторы.
9. Особенности стохастических колебательных систем.
10. Эмпирическое моделирование по временным рядам.
11. Нелинейная динамика уравнения Гинзбурга-Ландау: Амплитудная и фазовая турбулентность.
12. Примеры абсолютной и конвективной неустойчивости в природе и технике.
13. Модели открытых систем: приложение методов нелинейной динамики к изучению сложных биологических и химических объектов.
14. Конструктивная роль флуктуаций в нелинейных системах.

#### Требования к реферату,

1. Ясная формулировка темы и постановка базовых целей и задач
2. Введение должно содержать:
  - актуальность, где обосновывается выбор данной темы.
  - объект, предмет, цель, задачи и методы исследования
  - практическую и теоретическую значимость работы
3. Основная часть должна быть четко структурирована, с разбиением на параграфы, подпараграфы т.д., содержать краткие выводы.
4. Заключение должно содержать итоговые результаты и выводы.
5. Список используемой литературы.
7. Подготовка реферата должна осуществляться на базе актуальных научных материалов (за 5 последних лет).
8. Объем реферата не менее 15 страниц.

#### Правила оформления.

Реферат должен быть выполнен с использованием компьютера и принтера на одной стороне листа белой бумаги формата А4 шрифтом Times New Roman через полтора интервала. Цвет шрифта должен быть черным, высота цифр, букв и других знаков - размером 14 пт (кеглей).

Текст работы следует печатать, соблюдая следующие размеры полей: левое - 25 мм, правое - 15 мм, верхнее и нижнее — 20 мм.

Объем реферата, как правило, составляет 15 - 20 страниц. Количество страниц, отводимых на каждый раздел работы, определяется аспирантом самостоятельно.

Допускается использовать компьютерные возможности для акцентирования внимания на определениях, терминах, формулах и других важных особенностях путем применения разных начертаний шрифта (курсив, полужирный, полужирный курсив и др.).

Список литературы должен быть оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1, ГОСТ 7.80 и ГОСТ 7.82.

### Критерии оценки:

«зачтено»	Полное соответствие требованиям и правилам оформления реферата. Полнота, достоверность, адекватность и объем используемых источников информации. Полное раскрытие темы реферата.
«не зачтено»	Не соответствие требованиям и правилам оформления реферата. Отсутствие выводов, недостаточный объем источников информации. Устаревшие и не актуальные научные материалы.

### Практические задания

1. Анализ состояний равновесия и их устойчивости для ряда радиофизических систем.
2. Типичные бифуркации состояний равновесия. Построение бифуркационных диаграмм.
3. Численное моделирование бифуркаций одномерных отображений
4. Численное моделирование бифуркации двумерных отображений
5. Мягкая бифуркация рождения цикла в генераторе Ван дер Поля. Сопоставление теоретических и численных результатов
6. Построение фазо-параметрической диаграммы для логистического отображения.
7. Численное исследование мультипликаторов предельного цикла при удвоениях периода.
8. Построение фазовых портретов аттракторов в системе Лоренца и в системе Ресслера.
9. Построение сечений и отображений Пуанкаре в двумерной секущей поверхности для хаотических аттракторов трехмерных динамических систем.

### Темы индивидуальных творческих заданий

1. **Системы с импульсным возбуждением.** Подготовьте коллекцию систем, характеризующихся импульсным возбуждением периодической последовательностью дельта-функций, используя учебные материалы и учебную литературу. Рассмотрите осциллятор ван дер Поля, возбуждаемый периодической последовательностью дельта-функций. Постройте соответствующее отображение, используя в промежутках между импульсами решение методом медленно меняющихся амплитуд.
2. **Точка сборки в нелинейном маятнике.** Обсудите нелинейный резонанс в возбуждаемом осцилляторе Дуффинга с позиций теории катастроф и бифуркаций. Для этого на плоскости частота - период воздействия найдите область бистабильности. Покажите, что она имеет вид, характерный для точки сборки и укажите саму точку сборки. Обсудите зависимости отклика осциллятора от частоты сигнала в окрестности точки сборки. Укажите возможность гистерезиса в системе.
3. **Задачи синхронизации и бифуркации.** Обсудите задачу о синхронизации осциллятора ван дер Поля с позиций теории бифуркаций. Сначала обсудите случай укороченных уравнений. Как классифицируются в терминах теории бифуркаций основные линии и точки на плоскости частота - амплитуда воздействия? Аналогично обсудите случай исходной системы уравнений.
4. **Бифуркация Богданова-Тakensа.** С помощью интернета и учебной литературы найдите примеры систем с бифуркацией Богданова-Тakensа. Как проявляются свойства этой бифуркации в конкретных задачах?
5. **Метод медленно меняющихся амплитуд.** Подготовьте «коллекцию» задач теории колебаний и нелинейной динамики, известных вам из учебных материалов, для которых применяется метод медленно меняющихся амплитуд. Сформулируйте самостоятельно несколько других задач, для которых можно применить этот метод. Постройте соответствующие укороченные уравнения.
5. **Бифуркации в трехмерных отображениях.** Рассмотрите трехмерное отображение общего вида. Введите инварианты матрицы возмущений и установите связь мультипликаторов с этими инвариантами. Проанализируйте возможность основных бифуркаций в пространстве инвариантов матрицы возмущений по аналогии с двумерными отображениями. Какие новые бифуркации возможны в трехмерных отображениях?

### Методические рекомендации по оформлению заданий:

Отчет по всем заданиям желательнее оформить в электронном виде в среде LaTeX.

## Критерии оценки:

«зачтено»	Полное соответствие требованиям и правилам оформления задания. Полнота, достоверность, адекватность и объем используемых источников информации. Полное выполнение задания.
«не зачтено»	Не соответствие требованиям и правилам оформления задания. Отсутствие выводов, недостаточный объем источников информации. Устаревшие и не актуальные научные материалы.

## Контрольные вопросы к зачету

### Раздел I

1. Динамическая система и ее математическая модель: определение, классификация, аттракторы.
2. Сечение Пуанкаре.
3. Классификация динамических систем.
4. Устойчивость решений обыкновенных дифференциальных уравнений. Уравнения для малых возмущений. Спектр характеристических ляпуновских показателей.
5. Устойчивость периодических решений, мультипликаторы предельного цикла.
6. Бифуркации состояний равновесия, коразмерность бифуркации.
7. Бифуркация Андронова-Хопфа.
8. Классификация бифуркаций по коразмерности.
9. Бифуркации предельных циклов.
10. Простейшие свойства одномерных отображений. Неподвижные точки, циклы и их мультипликаторы.
11. Бифуркации одномерных отображений.
12. Бифуркации двумерных отображений.
13. Символическая динамика и сдвиг Бернулли в отображении «зуб пилы» и в логистическом отображении.
14. Детерминированный хаос.
15. Переход к хаосу через каскад бифуркаций удвоения периода.
16. Разрушение квазипериодических колебаний и возможные сценарии перехода к хаосу
17. Гиперболический и негиперболический хаос.
18. Классификация аттракторов. Регулярные и хаотические аттракторы динамических систем.
19. Постановка задачи о реконструкции динамических систем по одномерной реализации.

### Раздел 2

1. Шум в динамических системах. Характеристики стохастического поведения. Стохастические аттракторы.
2. Стохастические бифуркации и индуцированные шумом переходы.
3. Стохастические бифуркации в одномерных потоковых системах. Особенности влияния мультипликативного шума.
4. Стохастическая бифуркация Андронова-Хопфа при аддитивном и мультипликативном шумовом воздействии. Теоретический анализ суперкритической и субкритической бифуркации на примере гармонического генератора.

## Критерии оценки

Отметка «зачтено» ставится аспирантам, успешно выполнившим в полном объеме задание научного исследования, если продемонстрированы хотя бы:

- в целом успешное применение навыков поиска и критического анализа информации по тематике проводимых исследований;
- в целом успешное использование умений: выбирать и применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования;
- в целом успешные знания современных способов использования информационно-коммуникационных технологий в выбранной сфере деятельности;
- в целом успешное применение навыков: ориентации в источниках и научной литературе; логики и терминологии научного исследования
- в целом успешное применение умений: по обоснованию актуальности, новизны,

теоретической и практической значимости исследования, определения методологии исследований, анализа данных и делать достоверные выводы, оппонирования и рецензирования научных работ.

- в целом успешные знания: принципов построения научного исследования, требований к оформлению библиографического списка и ссылок в исследовании либо более высокий уровень знаний, умений и владений.

Отметка «не зачтено» ставится аспиранту, не выполнившему в полном объеме задание научного исследования, если он продемонстрировал:

- фрагментарное применение навыков поиска и критического анализа информации по тематике проводимых исследований;
- фрагментарное использование умений выбирать и применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования;
- фрагментарное знание современных способов использования информационно-коммуникационных технологий в выбранной сфере деятельности,
- фрагментарное применение навыков: ориентации в источниках и научной литературе; логики и терминологии научного исследования;
- фрагментарное использование умений: по обоснованию актуальности, новизны, теоретической и практической значимости исследования, определения методологии исследований, анализа данных и делать достоверные выводы, оппонирования и рецензирования научных работ;
- фрагментарное знание: принципов построения научного исследования , требований к оформлению библиографического списка и ссылок в исследовании; либо не продемонстрировал соответствующие знания и умения вовсе.