

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕ-  
РАЦИИ

**Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический  
(факультет / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ  
протокол от  
«14» декабря 2021 г. № 4

Рабочая программа дисциплины (модуля)

**Качественно-численные методы исследования нелинейных динамических систем**

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

**бакалавриат**

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

**Направление подготовки / специальность**

**03.03.03 «Радиофизика»**

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

**«Фундаментальная радиофизика»**

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

**бакалавр**

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

**очная**

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижний Новгород

20\_\_ год

## 1. Место и цели дисциплины (модуля) в структуре ОПОП

Дисциплина «Качественно-численные методы исследования нелинейных динамических систем» относится к дисциплинам по выбору (блок Б1.В.ДВ2) основной профессиональной образовательной программы (ОПОП) высшего образования по направлению подготовки 03.03.03 «Радиофизика» на радиофизическом факультете ННГУ, изучается в 7-м семестре.

### Целями освоения дисциплины являются:

Дисциплина обеспечивает приобретение знаний и умений исследования динамики нелинейных систем, содействует формированию мировоззрения и системного мышления. Цель преподавания дисциплины состоит в ознакомлении студентов с современными методами компьютерного анализа нелинейной динамики многомерных динамических систем, базирующихся на качественных методах теории нелинейных колебаний и теории бифуркаций.

#### Задачи дисциплины:

- дать понятие о методах исследования нелинейных процессов динамических систем с непрерывным временем;
- ознакомить с системным подходом исследования нелинейных систем, основанных на методах качественной теории динамических систем и теории бифуркаций;
- дать основные сведения об алгоритмах и способах проведения вычислительного эксперимента при изучении нелинейной динамики многомерных систем;
- выработать навыки по созданию и использованию математических моделей для решения задач анализа и оптимизации нелинейных систем.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
<i>ПК-1-</i> Способность решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности  <i>этап освоения заключительный</i>	З1 (ПК-1). Знать методы и подходы решения задач изучения нелинейных динамических систем на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности. У1 (ПК-1). Уметь применять методы изучения нелинейных динамических систем на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности.

	ности. В1 (ПК-1). Владеть аппаратом теории нелинейных колебаний на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности
ПК-2 способностью использовать основные методы радиофизических измерений  <i>этап освоения заключительный</i>	32 (ПК-2). Знать методы радиофизических измерений, использующих знания теории нелинейных колебаний У2 (ПК-2). Уметь применять методы радиофизических измерений для анализа нелинейных колебательных процессов. В2 (ПК-2). Владеть методами радиофизических измерений нелинейных колебательных процессов.

### 3. Структура и содержание дисциплины «Качественно-численные методы исследования нелинейных динамических систем»

Объем дисциплины составляет 2 зачетные единицы, всего 72 часа, из которых 33 часа составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (32 часа занятия практического типа, 1 час мероприятия промежуточной аттестации), 39 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

#### Содержание дисциплины

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),  форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)		В том числе									
			Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы								Самостоятельная работа обучающегося, часы	
			из них									
	Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	Очная	Очно-заочная	Очная	Очно-заочная	Очная	Очно-заочная	Очная	Очно-заочная
Исследование состояний равновесия многомерных нелинейных динамических систем и	12				6				6		6	

их бифуркаций.												
Исследования нелинейных динамических моделей путем построения проекций фазовых траекторий и временных реализаций.	9				4				4		5	
Исследования нелинейных динамических моделей методом отображения Пуанкаре	8				4				4		4	
Исследование периодических движения многомерных динамических систем и их бифуркации.	10				4				4		6	
Исследование гомоклинических и гетероклинических бифуркаций динамических систем	9				4				4		5	
Странные аттракторы и способы их исследования	9				4				4		5	
Динамика конкретных динамических систем	14				6				6		8	
В т.ч.текущий контроль	2				2							
Промежуточная аттестация - <b>Зачет</b>												

#### Содержание разделов дисциплины

**Раздел I.** Состояния равновесия многомерных нелинейных динамических систем и их бифуркации. Практические алгоритмы изучения состояний равновесия: поиск координат состояний равновесия, определение их типа, вычисление бифуркационных значений параметров и построение бифуркационных кривых, алгоритмы вычисления первой

ляпуновской величины функционального модуля «Состояния равновесия» программного комплекса ДНС (Динамика Нелинейных Систем).

**Раздел II.** Исследования нелинейных динамических моделей путем построения проекций фазовых траекторий и временных реализаций. Численные методы интегрирования систем ОДУ (одношаговые, многошаговые, жестких и стохастических систем), основные принципы построения программ численного интегрирования. Особенности представления фазовых траекторий динамических систем с цилиндрическим и тороидальным фазовыми пространствами. Технология исследования нелинейных динамических моделей путем численного построения проекций фазовых траекторий и временных реализаций. Структура, функциональные возможности и правила работы функционального модуля «Фазовые портреты» программного комплекса ДНС.

**Раздел III.** Метод отображений Пуанкаре, его роль при изучении непрерывных динамических систем. Алгоритмы численного построения отображения Пуанкаре, особенности построения для систем с циклическими координатами. Технология исследования динамических систем путем численного построения отображения Пуанкаре. Структура, функциональные возможности и правила работы функциональных модулей «Точечные отображения» и «Бифуркационные диаграммы отображения Пуанкаре» программного комплекса ДНС.

**Раздел IV.** Периодические движения многомерных динамических систем и их бифуркации. Практические алгоритмы изучения периодических движений: алгоритмы поиска периодических движений (методы простой итерации, секущих, Ньютона, сеток) и определения их типа (вычисление мультипликаторов), принципы построения бифуркационных кривых. Технология изучения периодических движений динамических систем с помощью функциональных модулей «Периодические движения» и «Бифуркационные кривые периодических движений» программного комплекса ДНС.

**Раздел V.** Гомоклинические и гетероклинические бифуркации динамических систем. Структура фазового и параметрического пространства в окрестности бифуркационных кривых, соответствующих гомоклиническим и гетероклиническим траекториям. Алгоритм построения бифуркационных кривых, соответствующих совпадению сепаратрис седловых состояний равновесия многомерных динамических систем. Структура, функциональные возможности и правила работы функционального модуля «Сепаратрисные связки» программного комплекса ДНС.

**Раздел VI.** Практические занятия по применению информационных технологий, базирующихся на методах теории нелинейных колебаний.

*Текущий контроль успеваемости проходит в рамках занятий практического типа. Итоговый контроль осуществляется на зачете*

#### **4. Образовательные технологии**

В соответствии с рабочей программой и тематическим планом изучение дисциплины проходит в виде аудиторной и самостоятельной работы студентов. Учебный процесс в аудитории осуществляется в форме практических занятий.

Образовательные технологии, способствующие формированию компетенций используемые на занятиях практического типа:

- семинары с обсуждением учебного материала теоретического характера;
- практические занятия с использованием информационных технологий;
- регламентированная самостоятельная деятельность студентов;

- решение проблемных ситуаций для реализации технологии коллективной мыслительной деятельности.

## **5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

Используются виды самостоятельной работы студента: в читальном зале библиотеки, в учебных кабинетах (лабораториях), компьютерных классах, с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе курса и контролируется в ходе проведения аудиторных занятий и в конце курса при проведении зачета по данной дисциплине. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, а также конспекты лекций.

### Список контрольных вопросов:

1. Состояния равновесия многомерных нелинейных динамических систем и их бифуркации.
2. Практические алгоритмы изучения состояний равновесия.
3. Структура, функциональные возможности и правила работы программного комплекса LBER (Local Bifurcation Equilibrium Point) и функционального модуля «Состояния равновесия» программного комплекса ДНС (Динамика Нелинейных Систем).
4. Исследования нелинейных динамических моделей путем построения проекций фазовых траекторий и временных реализаций.
5. Численные методы интегрирования систем ОДУ.
6. Особенности представления фазовых траекторий динамических систем с цилиндрическим и тороидальным фазовыми пространствами.
7. Технология исследования нелинейных динамических моделей путем численного построения проекций фазовых траекторий и временных реализаций.
8. Структура, функциональные возможности и правила работы функционального модуля «Фазовые портреты» программного комплекса ДНС.
9. Метод отображений Пуанкаре, его роль при изучении непрерывных динамических систем.
10. Алгоритмы численного построения отображения Пуанкаре, особенности построения для систем с циклическими координатами.
11. Технология исследования динамических систем путем численного построения отображения Пуанкаре.
12. Структура, функциональные возможности и правила работы функциональных модулей «Точечные отображения» и «Бифуркационные диаграммы отображения Пуанкаре» программного комплекса ДНС.
13. Периодические движения многомерных динамических систем и их бифуркации.
14. Практические алгоритмы изучения периодических движений: алгоритмы поиска периодических движений и определения их типа, принципы построения бифуркационных кривых.
15. Технология изучения периодических движений динамических систем с помощью функциональных модулей «Периодические движения» и «Бифуркационные кривые периодических движений» программного комплекса ДНС.
16. Гомоклинические и гетероклинические бифуркации динамических систем.
17. Структура фазового и параметрического пространства в окрестности бифуркационных кривых, соответствующих гомоклиническим и гетероклиническим траекториям.

18. Алгоритм построения бифуркационных кривых, соответствующих совпадению сепаратрис седловых состояний равновесия многомерных динамических систем.
19. Структура, функциональные возможности и правила работы функционального модуля «Сепаратрисные связки» программного комплекса ДНС.
20. Странные аттракторы.
21. Способы и алгоритмы идентификации странных аттракторов в численном эксперименте.
22. Бифуркационные механизмы перехода к хаосу и метод идентификации их в численном эксперименте.
23. Методы и подходы выделения областей параметров, соответствующих хаотическому поведению динамической системы.
24. Структура, функциональные возможности и правила работы функциональных модулей «Ляпуновские характеристические показатели» и «Спектры и автокорреляционные функции» программного комплекса ДНС.

## **6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)**

### **6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, навыков), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования**

*ОПК-3:* Способность решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Знания</u> Знать методы и подходы решения задач изучения нелинейных динамических систем на основе информационных технологий	Отсутствие знаний материала	Наличие грубых ошибок в основном материале	Знание основного материала с рядом негрубых ошибок	Знание основного материала 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</u>	Отсут-	Наличие	Способ-	Способ-	Способ-	Способ-	Способ-

Уметь применять методы изучения нелинейных динамических систем на основе информационных технологий	способность решения стандартных задач	грубых ошибок при решении стандартных задач	ность решения основных стандартных задач с существенными ошибками	ность решения всех стандартных задач с незначительными погрешностями	ность решения всех стандартных задач без ошибок и погрешностей	ность решения стандартных и некоторых нестандартных задач	ность решения стандартных задач и широкого круга нестандартных задач
<u>Навыки</u> Владеть аппаратом теории нелинейных колебаний с использованием информационных технологий	Полное отсутствие навыка	Отсутствие навыка	Владение навыком в минимальном объеме	Посредственное владение навыком	Достаточное владение навыком	Хорошее владение навыком	Всестороннее владение навыком
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20–50%	50 – 70 %	70-80 %	80 –90%	90– 99%	100%

**ПК-3: Владением компьютером на уровне опытного пользователя, способностью к применению информационных технологий**

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)						
	«плохо»	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«очень хорошо»	«отлично»	«превосходно»
<u>Знания</u> Знать информацион-	Отсутствие знаний материала	Наличие грубых ошибок в основ-	Знание основного материала с рядом	Знание основного материала с ря-	Знание основного материала	Знание основного материала	Знание основного и допол-



ные технологии, базирующиеся на современных методах качественной теории нелинейных колебаний и теории бифуркаций.		ном материале	негрубых ошибок	дом заметных погрешностей	с незначительными погрешностями	без ошибок и погрешностей	нительного материала без ошибок и погрешностей
<u>Умения</u> Уметь применять информационные технологии, базирующиеся на методах качественной теории нелинейных колебаний и теории бифуркаций для анализа физических явлений и процессов.	Отсутствует способность решения стандартных задач	Наличие грубых ошибок при решении стандартных задач	Способность решения основных стандартных задач с существенными ошибками	Способность решения всех стандартных задач с незначительными погрешностями	Способность решения всех стандартных задач без ошибок и погрешностей	Способность решения стандартных и некоторых нестандартных задач	Способность решения стандартных задач и широкого круга нестандартных задач
<u>Навыки</u> Владеть информационными технологиями, базирующиеся на современ-	Полное отсутствие навыка	Отсутствии навыка	Владение навыком в минимальном объеме	Посредственное владение навыком	Достаточное владение навыком	Хорошее владение навыком	Всестороннее владение навыком

менных методах качественной теории нелинейных колебаний и теории бифуркаций							
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 20 %	20–50%	50 – 70 %	70-80 %	80 –90%	90– 99%	100%

## 6.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Итоговый контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде зачета, 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.

Зачет проводится в устной форме и заключается в ответе студентом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой), либо решение задач и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ.

Критерии оценок.

Зачтено	Обучающийся после подготовки с использованием конспекта лекций может последовательно изложить ответ на контрольный вопрос, знает основные понятия и определения из материала дисциплины, может решить задачу из практических контрольных занятий.
Не зачтено	Студент после подготовки с использованием конспекта лекций не может последовательно изложить ответ на контрольный вопрос, либо не знает основные понятия и определения из материала дисциплины, не может решить задачу из практических контрольных занятий.

## 6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих сформированность компетенций

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

- устные и письменные ответы на вопросы.

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

- практические контрольные задания

Для проведения итогового контроля сформированности компетенции используются: устный опрос, решение практических задач.

#### **6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции**

**Примеры вопросов к зачету для оценки сформированности компетенций ПК-1, ПК-2:**

№	Вопрос	компетенция
1.	Классификация состояний равновесия многомерных нелинейных динамических систем	<i>ПК-1</i>
2.	Бифуркации состояний равновесия многомерных нелинейных динамических систем	<i>ПК-1</i>
3.	Классификация периодических решений многомерных нелинейных динамических систем	<i>ПК-1</i>
4.	Бифуркации периодических решений многомерных нелинейных динамических систем	<i>ПК-1</i>
5.	Технология исследования нелинейных динамических моделей путем численного построения проекций фазовых траекторий и временных реализаций.	<i>ПК-1</i>
6.	Практические алгоритмы изучения состояний равновесия.	<i>ПК-2</i>
7.	Структура, функциональные возможности и правила работы программного комплекса функционального модуля «Состояния равновесия» программного комплекса ДНС	<i>ПК-2</i>
8.	Структура, функциональные возможности и правила работы функционального модуля «Фазовые портреты» программного комплекса ДНС.	<i>ПК-2</i>
9.	Алгоритмы численного построения отображения Пуанкаре, особенности построения для систем с циклическими координатами	<i>ПК-2</i>
10.	Структура, функциональные возможности и правила работы функциональных модулей «Ляпуновские характеристические показатели» и «Спектры и автокорреляционные функции» программного комплекса ДНС.	<i>ПК-2</i>

**Типовые задачи для оценивания сформированности умений и навыков по компетенциям ПК-1, ПК-2:**

№	задание	компетенция
---	---------	-------------

1.	Найти и определить тип состояния равновесия модели третьего порядка	ПК-1
2.	Построить отображение Пуанкаре хаотического аттрактора	ПК-1
3.	Измерить период и амплитуду периодических предельного цикла 2-го рода	ПК-2
4.	Вычислить мультипликаторы предельного цикла	ПК-1
5.	Продemonстрировать бифуркацию удвоения периода периодического решения	ПК-2
6.	Построить фазовый портрет модели второго порядка	ПК-2
7.	Вычислить характеристики хаотического аттрактора	ПК-1

### 6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утвержденное приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 г. №55-ОД,

Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

### а) основная литература:

1. Матросов В.В. Моделирование нейрореподобных элементов и сетей на базе фазоуправляемых генераторов. Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский университет, 2011.  
<http://www.unn.ru/e-library/methodmaterial.html?pscience=7>
2. Матросов В.В., Шалфеев В.Д., Динамический хаос в фазовых системах: Учебное пособие. Издание второе, дополненное. Нижний Новгород. Издательство Нижегородский университет 2009.
3. Пономаренко В. П., Матросов В. В. - Моделирование динамических процессов в автогенераторных системах с частотным управлением: учеб. пособие. - Н. Новгород: ННГУ, 1997. - 114 с.
4. Матросов В.В. Динамика нелинейных систем. // Программный комплекс для исследования нелинейных динамических систем с непрерывным временем: учебно-методическая разработка Нижегородский Государственный Университет им. Н.И. Лобачевского, 2002.  
[http://www.rf.unn.ru/rus/ktk/sites/default/files/manual\\_matrosov\\_dns.PDF](http://www.rf.unn.ru/rus/ktk/sites/default/files/manual_matrosov_dns.PDF)
5. Неймарк Ю. И. - Метод точечных отображений в теории нелинейных колебаний. - М.: Наука, 1972. - 471 с.
6. Основные бифуркации динамических систем: учеб. пособие. / Афраимович В. И., Гаврилов Н. К., Лукьянов В. И., Шильников Л. П. - Горький: ГГУ, 1985. - 92 с.
7. Матросов В.В., Шалфеев В.Д., Сергеев О.С. Генератор хаотических колебаний// Специальный практикум по радиофизике и электронике. Часть II. Радиоастрономия и распространение радиоволн. Теория колебаний./ Под ред. С.Н. Гурбатова. – Н. Новгород: ИПФ РАН, 2001. 332 с.

[http://www.rf.unn.ru/rus/ktk/sites/default/files/manual\\_matrosova\\_chua.DOC](http://www.rf.unn.ru/rus/ktk/sites/default/files/manual_matrosova_chua.DOC)

8. Матросов В.В. Моделирование систем: анализ динамики и расчет динамических характеристик системы ФАП с пропорционально-интегрирующим фильтром// Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: ННГУ, 2012. – 26с.

[http://www.rf.unn.ru/rus/ktk/sites/default/files/manual\\_matrosova\\_modelling\\_fap.pdf](http://www.rf.unn.ru/rus/ktk/sites/default/files/manual_matrosova_modelling_fap.pdf)

б) дополнительная литература:

1. Методы качественной теории в нелинейной динамике. / Шильников Л. П., Шильников А. Л., Тураев Д. В., Чуа Л. Ч. 1. - М. ; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. - 416 с.
2. Методы качественной теории в нелинейной динамике. / Шильников Л. П., Шильников А. Л., Тураев Д. В., Чуа Л. Ч. 2. - М. ; Ижевск, 2009. - 548 с.
3. Мун Ф. Хаотические колебания. Вводный курс для научных работников и инженеров. Пер. с англ. - М.: Мир, 1990. -312с.
4. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение. Пер. с англ. - М.: Мир, 1988. -240с.
5. Анищенко В.С., Т.Е. Вадивасова, В.В. Астахов. Нелинейная динамика хаотических и стохастических систем. Фундаментальные основы и избранные проблемы / Под ред. В.С. Анищенко - Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1990. -368с.

## **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

8.1 Аудитория для практических занятий в группе

8.2 Компьютерный класс

8.3 Комплексы программ для ЭВМ:

- Программный комплекс «Динамика нелинейных систем»
- Программа ЭВМ для построения фазовых портретов и осциллограмм многомерных нелинейных динамических систем с непрерывным временем
- Программа ЭВМ для построения проекций отображения Пуанкаре многомерных нелинейных динамических систем с непрерывным временем

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО с учетом рекомендаций и ОПОП ВПО по направлению 03.03.03 «Радиофизика».

Автор Матросов В.В.

Рецензент (ы) Осипов Г.В.

Заведующий кафедрой

Матросов В.В.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета от «9» декабря 2021 года, протокол № 07/21